

UNIVERSITÉ DE MONTRÉAL

AMÉLIORATION DE LA FLEXIBILITÉ ET DE LA ROBUSTESSE DES
SYSTÈMES TRANSITIQUES

AHMED JOUBAIR

DÉPARTEMENT DE MATHÉMATIQUES ET DE GÉNIE INDUSTRIEL
ÉCOLE POLYTECHNIQUE DE MONTRÉAL

MÉMOIRE PRÉSENTÉ EN VUE DE L'OBTENTION
DU DIPLÔME DE MAÎTRISE ÈS SCIENCES APPLIQUÉES
(GÉNIE INDUSTRIEL)

AVRIL 2007

Ahmed Joubair, 2007.



Library and
Archives Canada

Bibliothèque et
Archives Canada

Published Heritage
Branch

Direction du
Patrimoine de l'édition

395 Wellington Street
Ottawa ON K1A 0N4
Canada

395, rue Wellington
Ottawa ON K1A 0N4
Canada

Your file Votre référence

ISBN: 978-0-494-29239-6

Our file Notre référence

ISBN: 978-0-494-29239-6

NOTICE:

The author has granted a non-exclusive license allowing Library and Archives Canada to reproduce, publish, archive, preserve, conserve, communicate to the public by telecommunication or on the Internet, loan, distribute and sell theses worldwide, for commercial or non-commercial purposes, in microform, paper, electronic and/or any other formats.

The author retains copyright ownership and moral rights in this thesis. Neither the thesis nor substantial extracts from it may be printed or otherwise reproduced without the author's permission.

AVIS:

L'auteur a accordé une licence non exclusive permettant à la Bibliothèque et Archives Canada de reproduire, publier, archiver, sauvegarder, conserver, transmettre au public par télécommunication ou par l'Internet, prêter, distribuer et vendre des thèses partout dans le monde, à des fins commerciales ou autres, sur support microforme, papier, électronique et/ou autres formats.

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

In compliance with the Canadian Privacy Act some supporting forms may have been removed from this thesis.

Conformément à la loi canadienne sur la protection de la vie privée, quelques formulaires secondaires ont été enlevés de cette thèse.

While these forms may be included in the document page count, their removal does not represent any loss of content from the thesis.

Bien que ces formulaires aient inclus dans la pagination, il n'y aura aucun contenu manquant.


Canada

UNIVERSITÉ DE MONTRÉAL

ÉCOLE POLYTECHNIQUE DE MONTRÉAL

Mémoire intitulé :

AMÉLIORATION DE LA FLEXIBILITÉ ET DE LA ROBUSTESSE DES
SYSTÈMES TRANSITIQUES

présenté par : JOUBAIR Ahmed

en vue de l'obtention du diplôme de : Maîtrise ès sciences appliquées

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

M. TRÉPANIÉ Martin, ing. Ph.D., président

Mme RIOPEL Diane, ing., Docteure, membre et directrice de recherche

M. HURTEAU Richard, ing. D. Ing., membre

REMERCIEMENTS

En premier lieu, je présente mes remerciements à ma directrice, Mme Diane Riopel, pour sa disponibilité, son aide précieuse et son soutien durant la réalisation du projet et la rédaction de ce mémoire. Je tiens à remercier M. Martin Trépanier d'avoir accepté de présider le jury et M. Richard Hurteau, directeur du département du génie électrique, d'avoir accepté d'être un membre du jury et pour son implication dans ce projet.

Je tiens aussi à remercier M. Patrick Isac pour son aide technique dans la réalisation des programmes de commande. Mes remerciements s'adressent aussi aux techniciens du département de génie électrique et industriel pour leur aide durant la réalisation de ce projet : Mme Marie-Lyne Brisson, M. Patrick Hamel et M. Richard Grenier.

RÉSUMÉ

Ce travail de recherche porte sur les méthodes d'amélioration de la flexibilité et de la robustesse des systèmes transitiques (*ST*). Les *ST* sont des systèmes de manutention automatisé flexible, permettant d'acheminer efficacement et avec efficience les différents produits pendant leurs processus de production. Un bon *ST* est caractérisé par sa flexibilité et sa robustesse. La flexibilité d'un système est définie comme étant [*sa capacité d'être reconfigurer, au niveau de ses ressources, pour produire efficacement différents produits avec des qualités acceptables*], Sethi (1990). La robustesse est définie par Ali et al. (2003) comme étant [*le degré auquel un système peut fonctionner correctement en présence de circonstances différentes de celles assumées*].

Les concepts, d'amélioration de la flexibilité et de la robustesse des *ST*, proposés dans ce mémoire sont adaptés à des applications ayant les caractéristiques suivantes :

- manutention des produits basée sur l'utilisation des transporteurs et des convoyeurs ;
- possibilité d'avoir des files d'attentes aux postes de travail;
- possibilité de contourner les postes de travail via des stations de transfert et des transporteurs de contournement;
- circuit de manutention linéaire;
- circuit de manutention en forme de U;
- circuit de manutention en boucle fermée.

Les concepts proposés dans le présent travail ne sont pas destinés à des *ST* convergents, divergents ou à base d'*AGV*.

La méthodologie utilisée dans ce mémoire consiste, en premier lieu, à proposer une méthode d'amélioration de la flexibilité des *ST*, basée sur une décomposition physique et logique du système sur plusieurs niveaux hiérarchiques. La notion de réutilisation des programmes de commande est omniprésente dans l'objectif de minimiser les temps de conception ou de réingénierie. En second lieu, trois modes de fonctionnement, adaptés au contexte du système de production, sont proposés :

- mode manuel : mode de fonctionnement dégradé;
- mode semi-automatique : mode de fonctionnement dédié à la production par lots, pour des gammes de production à faible ou moyen niveau de complexité;
- mode automatique : mode de fonctionnement dédié à la production multiproduit ou par lots, avec des gammes de production complexes. Ce mode de fonctionnement, non réalisé dans le cadre de ce travail de recherche, doit utiliser un système de reconnaissance des produits, basé sur des étiquettes électroniques.

En dernier lieu, une méthode d'amélioration de la robustesse des *S.T* est proposée. Cette méthode consiste à diagnostiquer et surmonter le problème de situations de blocage. Cela est possible grâce à une méthode de gestion de priorités de libération des produits. Cette méthode est basée sur la gestion des files d'attente des postes de travail et de leurs temps d'opération. En second lieu, et dans le contexte d'amélioration de la robustesse des *ST*, ce mémoire présente une méthode de *gestion d'orientation des produits*. Cette méthode permet d'éviter les problèmes de confusion de destinations qui peuvent atteindre le programme de commande, en cas d'utilisation multiple de postes de travail dans la même gamme de production. En outre, pour minimiser le nombre d'arrêts totaux des *ST*, ce travail soulève la nécessité d'établir des programmes de maintenance préventive pour les éléments critiques des systèmes en question.

Les différents concepts proposés dans ce mémoire sont testés et validés par des essais pratiques dans un atelier test. Ces applications sont effectuées à travers la conception et la réalisation des programmes de commande d'une multitude de gammes de production. Ces réalisations démontrent la pertinence de la méthode de décomposition hiérarchique de la partie physique et commande du *ST*, en facilitant les opérations de conception et de réalisation et en réduisant les temps de ces opérations. Les applications ont prouvé l'efficacité des méthodes proposées pour la détection et le contournement des situations de blocage ainsi que pour l'orientation des produits pour des gammes de production à utilisation multiple du même poste de travail.

ABSTRACT

This research work relates to the improvement flexibility and robustness in automated material handling system (AMHS). The AMHS are flexible automated handling systems, which convey effectively and with efficiency various products during their production process. A good AMHS is characterized by its flexibility and its robustness. [*Flexibility in manufacturing means being able to reconfigure manufacturing resources so as to produce efficiently different products of acceptable quality*], Sethi (1990). The robustness is defined by Ali and al. (2003) as being [*the degree to which a system can function correctly in the presence of inputs different from those assumed*].

AMHS flexibility and the robustness improvement concepts proposed in this thesis are adapted to applications having the following characteristics:

- handling of the products based on the use of the conveyors;
- possibility of having queues at the work stations;
- possibility to bypass the work stations via transfer stations and conveyors;
- linear handling path;
- U-shaped handling path;
- closed loop handling path.

Concepts suggested in this work are not intended for convergent, divergent AMHS, or AGV based.

The methodology used in this research consists, initially in proposing an improvement method of AMHS flexibility's, based on physical and logical decomposition of the system at several hierarchical levels. Re-using control programs concept is omnipresent, in the objective of minimizing times of design or in reengineering. Secondly, three operating modes, adapted to the context of production system, are proposed:

- manual mode: degraded operating mode;
- semi-automatic mode: operating mode dedicated to batches production, for *production routing* at low or medium level of complexity;

- automatic mode: operating mode dedicated to multiproduct or batches production, with complex production routing. The automatic operating mode, not carried out within this research, must use a system of products recognition, based on electronic labels.

Lastly, an improvement method of AMHS robustness is proposed. This method consists in diagnose and overcome deadlock situations problem. This becomes possible with a priorities management method of products release. It is based on queuing management of work stations and their operation time. Secondly, in an AMHS improvement robustness context, this thesis presents a product orientation management method which gives the opportunity to avoid destination confusion problem in the command program when, in the same production routing, multiple use of a work station occurs. In addition, to minimize the total number of AMHS failures, this works bring up the necessity to establish preventive maintenance programmes for systems critical elements.

The various concepts proposed in this research are tested and validated by practical tests in a workshop test environment. These applications are carried out through designing and realizing control programs for a multitude of production routing. These achievements are showing the relevance of hierarchical decomposition method of AMHS physical and command part, by facilitating the designing and realisation operations and by reducing their duration. Applications proved the effectiveness of suggested methods in detecting and bypassing deadlock situations, as well as the products orientation for multiple uses of a work station in the same production routing.

TABLE DES MATIÈRES

REMERCIEMENTS	iv
RÉSUMÉ.....	v
ABSTRACT	vii
TABLE DES MATIÈRES	ix
LISTE DES TABLEAUX.....	xiv
LISTE DES FIGURES	xv
LISTE DES ANNEXES	xviii
CHAPITRE 1 – INTRODUCTION.....	1
CHAPITRE 2 – REVUE DE LITTÉRATURE	5
2.1 - Introduction.....	5
2.2 - Flexibilité et efficacité des <i>ST</i>	6
2.2.1 - Méthodes de décomposition des <i>ST</i> (amélioration de la flexibilité).....	6
2.2.2 - Efficacité des <i>ST</i>	9
2.3 - Réingénierie et robustesse des <i>ST</i>	10
2.3.1 - Situations de blocage (amélioration de la robustesse)	11
2.3.2 - Résistance aux pannes	15
2.3.3 - Simulations des <i>ST</i>	16
2.4 - Conclusion	18
CHAPITRE 3 – CONCEPTS ET MÉTHODES PROPOSÉS	19
3.1 - Introduction.....	19

3.2 - Méthodologie	19
3.2.1 - Contexte	19
3.2.2 - Étapes de la méthodologie	21
3.3 - Amélioration de la flexibilité d'un <i>ST</i>	22
3.3.1 - Décomposition physique.....	23
3.3.2 - Décomposition logique	24
3.3.3 - Modes de fonctionnement du <i>ST</i>	26
3.4 - Amélioration de la robustesse d'un <i>ST</i>	27
3.4.1 - Gammes de production sans retours en arrière	30
3.4.2 - Gammes de production avec retours en arrière	33
3.4.3 - Méthode pour diagnostiquer les situations de blocage	36
3.4.4 - Méthode pour éliminer les situations de blocage.....	37
3.4.5 - Utilisation multiple d'un poste de travail dans la même gamme de production	40
3.5 - Conclusion	44
 CHAPITRE 4 – ATELIER TEST (laboratoire de transitique et de robotique de l'École Polytechnique de Montréal)	 46
4.1 - Introduction.....	46
4.2 - Contexte et objectifs du <i>ST</i>	46
4.2.1 - Contexte du <i>ST</i>	47
4.2.2 - Objectifs du <i>ST</i>	47
4.3 - Aspect général du <i>ST</i>	48
4.3.1 - Chaîne transitique	48
4.3.2 - Système de commande	55
4.3.3 - Système de supervision.....	58
4.4 – Décomposition hiérarchique du <i>ST</i>	59
4.4.1 - Installations opérationnelles	60

4.4.2 - Unités de travail	60
4.4.3 - Éléments d'unité	60
4.4.4 - Composants d'éléments	62
4.5 - Contraintes de fonctionnement du <i>ST</i>	62
4.5.1 - Contraintes physiques	63
4.5.2 - Contraintes technologiques et techniques.....	63
4.6 - Conclusion	63
CHAPITRE 5 - PROGRAMME DE TEST DU <i>ST</i>	65
5.1 - Introduction.....	65
5.2 - Gamme-test de production.....	65
5.2.1 - Objectifs de la gamme-test	65
5.2.2 - Présentation de la gamme-test utilisée.....	66
5.3 - Programmes de commande et système de supervision.....	67
5.3.1 - Programmes de commande.....	67
5.3.2 - Système de supervision du programme test.....	69
5.5 - Conclusion	70
CHAPITRE 6 – MODE SEMI-AUTOMATIQUE	71
6.1 - Introduction.....	71
6.2 - Phases de manutention des plateaux	72
6.2.1 - Entrée d'un plateau dans le <i>ST</i>	73
6.2.2 - Trajectoires suivies par les plateaux en mode semi-automatique	73
6.2.3 - Évacuation des plateaux du <i>ST</i>	73
6.3 - Procédure de réalisation et contraintes des programmes	74
6.3.1 - Procédure de réalisation des programmes de commande	74
6.3.2 - Contraintes des programmes de commande	74

6.4 - Présentation et analyse des gammes de production à programmer	75
6.4.1 - Gamme sans retour en arrière	76
6.4.2 - Gamme avec retour en arrière (avec situations de blocage)	77
6.4.3 - Gamme à utilisation multiple d'un poste de travail	86
6.5 - Réalisation des programmes de commande	88
6.5.1 - Gamme sans retour en arrière (P1 – P4 – P5)	88
6.5.2 - Gamme avec retours en arrière (P1 – P4 – P3)	92
6.5.3 - Gamme à utilisation multiple d'un poste de travail P1- P4 - P3 - P4 -P5	97
6.5.4 - Systèmes de supervision en mode semi-automatique	99
6.5.5 - Conception du programme d'une nouvelle gamme de production	101
6.6 - Conclusion	101
CHAPITRE 7 - MODE MANUEL	103
7.1 - Introduction	103
7.2 - Phases de manutention des plateaux	103
7.2.1 - Entrée des plateaux dans le <i>ST</i>	104
7.2.2 - Trajectoire suivie par les plateaux	104
7.2.3 - Évacuation des plateaux du <i>ST</i>	105
7.3 - Commande du <i>ST</i> en mode manuel	106
7.3.1 - Contraintes du fonctionnement en mode manuel	106
7.3.2 - Programmes de commande en mode manuel	107
7.3.3 - Communication entre les programmes du mode manuel	108
7.3.4 - Sous-programmes du poste d'entrée	109
7.3.5 - Sous-programmes des postes de travail	111
7.3.6 - Sous-programmes des stations de transfert	114
7.3.7 - Sous-programmes des transporteurs principal et d'entrée	114
7.4 - Système de supervision du mode manuel	115
7.4.1 - Informations concernant l'état du <i>ST</i>	115

7.4.2 - Informations quantitatives concernant les produits en traitement	116
7.5 - Conclusion	116
CHAPITRE 8 - CONCLUSION	118
BIBLIOGRAPHIE	122
ANNEXES.....	126

LISTE DES TABLEAUX

Tableau 3. 1. Identification de la criticité des ressources d'un <i>ST</i>	29
Tableau 3. 2. Ressources utilisées par chacun des programmes de la gamme P1-P4-P5	33
Tableau 4. 1. Capteurs utilisés dans les postes de travail.....	53
Tableau 4. 2. Actionneurs utilisés à la conception des postes de travail	54
Tableau 4. 3. Éléments des boîtes de commande des postes de travail	54
Tableau 4. 4. Capteurs utilisés aux stations de transfert	55
Tableau 4. 5. Installations opérationnelles du <i>ST</i> de l' <i>atelier test</i>	60
Tableau 4. 6. Éléments d'unité du <i>ST</i> de l' <i>atelier test</i>	61
Tableau 4. 7. Composants d'éléments du <i>ST</i> de l' <i>atelier test</i>	62
Tableau 5. 1. Trajectoire de la <i>gamme-test</i>	67
Tableau 6. 1. Les entités à la source des situations de blocage (trajectoire 1).....	78
Tableau 6. 2. Les entités à la source des situations de blocage (trajectoire 2).....	85
Tableau 6. 3. Ressources utilisées par chacune des deux trajectoires.....	86
Tableau 6. 4. Programmes de transfert utilisés pour la gamme P1 – P4 – P3	94
Tableau A. 1. Évolution des files d'attente (analyse 1)	128
Tableau A. 2. Évolution des files d'attente (analyse 2)	129
Tableau B. 1. Unité centrale de l'ancien système	131
Tableau B. 2. Module d'entrées logiques de l'ancien système	131
Tableau B. 3. Module de sorties logiques de l'ancien système	131
Tableau B. 4. Module de sorties Analogiques de l'ancien système.....	131
Tableau B. 5. Nouveau système d' <i>API</i>	132
Tableau C. 1. Adresses et câbles des capteurs du <i>ST</i>	133
Tableau C. 2. Adresses et câbles des actionneurs du <i>ST</i>	134

LISTE DES FIGURES

Figure 1. 1. Système flexible de production	2
Figure 3. 1. Chaîne de manutention linéaire	20
Figure 3. 2. Chaîne de manutention en forme U et boucle fermée	21
Figure 3. 3. Décomposition physique d'un <i>ST</i>	24
Figure 3. 4. Méthode de sélection du mode de fonctionnement d'un <i>ST</i>	27
Figure 3. 5. Trajectoire du programme initial de la gamme de production P1 - P4 - P5	31
Figure 3. 6. Trajectoire du programme alternatif de la gamme de production P1 - P4 - P5.	32
Figure 3. 7. Illustration d'une situation de blocage causé par les postes P1 et P5	35
Figure 3. 8. Diagnostic de blocage et choix de trajectoires	37
Figure 3. 9. Organigramme de la méthode de gestion de priorités de libération des postes de travail.....	39
Figure 3. 10. Organigramme de la méthode d'orientation des produits pour un poste à destinations multiples.....	42
Figure 4. 1. Éléments de la chaîne transitive	48
Figure 4. 2. Capteurs utilisés par le <i>ST</i>	51
Figure 4. 3. Actionneurs utilisés par le <i>ST</i>	52
Figure 4. 4. Composants d'un poste de travail (vue de dessus)	53
Figure 4. 5. Diagramme de communication entre les éléments du système	56
Figure 4. 6. Structure des programmes GRAFCET	57
Figure 4. 7. Affichage du système de supervision et de contrôle	59
Figure 5. 1. Trajectoire du programme de test du <i>ST</i>	66
Figure 5. 2. Communication entre les programmes du <i>programme Test</i>	68
Figure 5. 3. Écran du système de supervision du <i>programme test</i>	69
Figure 6. 1. Trajectoire du programme initial de la gamme de production P1 – P4 – P5	76

Figure 6. 2. Trajectoire du programme alternatif de la gamme de production P1 – P4 – P5	77
Figure 6. 3. Trajectoire 1	78
Figure 6. 4. Localisation des trois plateaux PL1, PL2 et PL3.....	79
Figure 6. 5. Blocage physique au niveau de la station de transfert ST5	80
Figure 6. 6. Éléments permettant d'éviter le blocage physique au niveau de ST5	80
Figure 6. 7. Chevauchement des trajectoires de plateaux quittant simultanément P1 et P4	81
Figure 6. 8. Chevauchement des trajectoires de plateaux quittant simultanément P3 et P4	82
Figure 6. 9. Organigramme de gestion de priorité de libération de plateaux entre les poste P1 et P4.....	84
Figure 6. 10. Trajectoire 2.....	84
Figure 6. 11. Trajectoire de la gamme P1- P4 – P3 – P4 – P5	87
Figure 6. 12. GRAFCET niveau 1 du programme type de commande d'un poste de travail en mode semi-automatique.	90
Figure 6. 13. GRAFCET niveau 2 du programme type de commande d'un poste de travail en mode semi-automatique.	91
Figure 6. 14. GRAFCET niveau 1 du programme de transfert de P1 vers P4.....	95
Figure 6. 15. GRAFCET niveau 1 du programme de transfert de P4 vers P3	95
Figure 6. 16. GRAFCET niveau 1 du programme de transfert de P3 vers la sortie	96
Figure 6. 17. Communication entre les programmes de transfert et les autres entités du système.....	97
Figure 6. 18. Organigramme de gestion de destination des plateaux à partir du poste P4	99
Figure 6. 19. Écran de supervision.....	100
Figure 7. 1. Trajectoire suivie par les plateaux en mode manuel.....	105
Figure 7. 2. Communications entre les programmes du mode manuel.....	108
Figure 7. 3. GRAFCET niveau 1 du programme du poste d'entrée	111

Figure 7. 4. GRAFCET niveau 1 du programme type d'un poste de travail en mode manuel	113
Figure 7. 5. GRAFCET niveau 1 du programme type en mode manuel d'une station de transfert	114
Figure 7. 6. GRAFCET niveau 1 du programme des transporteurs principal et d'entrée	115
Figure 7. 7. Écran de supervision affichant les informations des files d'attente	116
Figure A. 1. Trajectoire de la gamme P1 – P4 – P3	127

LISTE DES ANNEXES

ANNEXE A - Exemple de vérification de l'ordre des tests des files d'attente pour éviter les situations de blocage.....	126
ANNEXE B - Ancien et nouveau système d'automate programmable	131
ANNEXE C - Adressages et câbles des capteurs et des actionneurs du ST.....	133

CHAPITRE 1 – INTRODUCTION

Les entreprises manufacturières sont invitées à avoir de plus en plus une production diversifiée. Cela est dû à la concurrence qui incite les manufactures à essayer de séduire davantage les clients pour pouvoir garder leurs clientèles et améliorer leurs aspects concurrentiels, la férocité de la concurrence ne cesse d'accroître.

La diversification des produits fabriqués par une entreprise nécessite des chaînes de production flexibles, capables de s'adapter facilement aux éventuels changements de leurs configurations. Ainsi, dans plusieurs cas, et dans le cadre de ces nouvelles circonstances, une entreprise ne produit pas nécessairement un seul produit par chaîne de production. Elle procède souvent à la fabrication de plusieurs gammes de produits sur une même chaîne de production. Cela implique qu'en plus des machines de production flexibles, l'entreprise doit nécessairement se doter d'un système de manutention automatisé aussi flexible pour pouvoir acheminer efficacement et avec efficience les différents produits pendant leurs processus de production. Ces systèmes automatisés de manutention, sont appelés : *systèmes transitiques (ST)*.

Un système de production flexible est composé de deux parties essentielles, soit les machines flexibles de production et le système flexible de manutention (figure 1.1). Par conséquent, la flexibilité d'un tel système est basée principalement sur la flexibilité de ces deux éléments (les machines de production et le système de manutention). Un système flexible doit être *capable d'être reconfiguré, au niveau de ses ressources, pour produire efficacement différents produits avec des qualités acceptables* : Sethi et Sethi (1990).

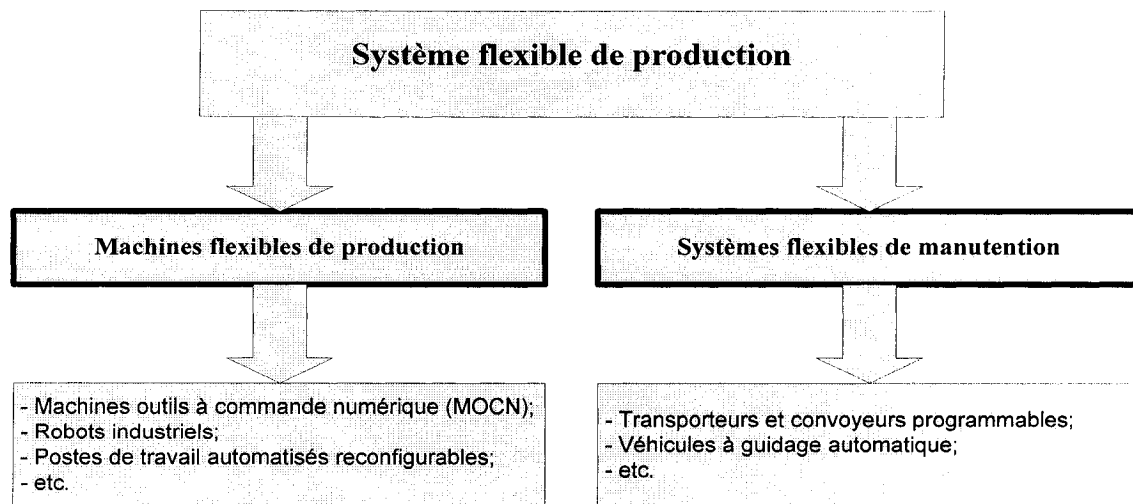


Figure 1. 1. Système flexible de production

Les postes de travail étudiés dans ce projet sont sous forme de postes manuels dont la commande se fait par des opérateurs via un ensemble de boutons poussoirs. Cependant, l'utilisation de n'importe quel autre type de machines flexibles de production est possible. Dans un cas pareil, ces machines communiqueront avec le *ST* via des signaux logiques sous formes de bits (0 ou 1).

Le présent projet ne traite pas des machines flexibles de production, il étudie uniquement les systèmes flexibles de manutention (*ST*). Cette étude consiste à proposer des méthodes pour améliorer la flexibilité et la robustesse de ces systèmes. La catégorie des *ST* concernée est celle des *ST* à base de convoyeurs et de transporteurs et ne couvre pas ceux utilisant les véhicules à guidage automatique (*AGV*).

La première étape de la méthodologie utilisée consiste à faire une décomposition physique du *ST* à plusieurs niveaux hiérarchiques, suivie d'une décomposition logique au niveau des programmes de commande. Ces décompositions sont exécutées dans l'objectif d'améliorer la flexibilité du *ST*, en facilitant la conception et la réalisation des programmes de commande. En second lieu, plusieurs modes de fonctionnement du *ST* sont proposés, dans l'objectif d'améliorer son adaptabilité à différentes catégories de production. La troisième étape consiste à l'amélioration de la robustesse des *ST* en

offrant une méthode qui permet de détecter la possibilité de situations de blocage et propose une méthode pour éviter ces situations, le cas échéant. Toujours dans le cadre d'amélioration de la robustesse des *ST*, la quatrième étape consiste à vérifier la présence d'utilisation multiple d'un poste de travail dans la même gamme de production, pour proposer une méthode permettant une bonne orientation des produits quittant les postes de travail à utilisation multiple, le cas échéant.

Quatre produits sont alors résultants de ce travail de recherche.

Pour améliorer la flexibilité *ST* :

- 1) une méthode de décomposition physique et logique des *ST*;
- 2) plusieurs modes de fonctionnement adaptés aux types de production.

Pour améliorer la robustesse des *ST* :

- 3) une méthode pour localiser et éviter les situations de blocage;
- 4) une méthode pour orienter correctement les produits à partir d'un poste de travail à utilisation multiple.

Les différents concepts proposés dans ce mémoire sont testés et validés par des essais pratiques dans un atelier test (aucune modification dans la partie physique ou la partie puissance du *ST* n'est autorisée). Ces applications sont réalisées à travers la conception et la réalisation des programmes de commande d'une multitude de gammes de production (chapitre 6). Ces réalisations démontrent la pertinence de la méthode de décomposition hiérarchique de la partie physique et commande du *ST* en facilitant les opérations de conception et de réalisation et en réduisant les temps de ces opérations. En outre, les applications ont prouvé l'efficacité des méthodes proposées pour la détection et le contournement des situations de blocage (sous-section 6.5.2) ainsi que l'orientation des produits, en utilisant une gamme de production à utilisation multiple du même poste de travail (sous-section 6.5.3).

Le chapitre 2 présente la revue de littérature qui fait un recensement des principaux domaines de recherche concernant les *ST*, et met la lumière sur la rareté des travaux de

recherche qui traitent la catégorie des *ST* qui fait l'objet de ce mémoire. Le chapitre 3 porte sur la méthodologie utilisée et les différentes méthodes et méthodes proposées pour l'amélioration de la flexibilité et de la robustesse des *ST*. Le chapitre 4 expose une description détaillée de l'atelier test (*laboratoires de robotique et de transitique* de l'École Polytechnique de Montréal) utilisé pour la réalisation des différents concepts proposés dans ce mémoire. Le chapitre 5 couvre le *programme test* du *ST* de l'atelier test. Il permet de faire la vérification du bon fonctionnement de toutes les ressources de celui-ci. Ce programme test procède à l'exécution d'une *gamme-test* de production d'un seul produit. Le chapitre 6 correspond à la partie de réalisation des programmes de commande du *ST* en mode semi-automatique. Il compte l'application des notions de décomposition du *ST* et de réutilisation des programmes, ainsi que la mise en œuvre de la méthode de gestion des files d'attente destiné à éviter les situations de blocage, en utilisant des gammes de production qui présentent ce type de problème. En outre, ce chapitre compte un exemple pratique pour la gestion d'orientation des produits, en utilisant une gamme de production avec utilisation multiple du même poste de travail. Le chapitre 7 couvre la partie de réalisation des programmes de commande du *ST* en mode manuel. La conclusion de ce mémoire est présentée au chapitre 8.

CHAPITRE 2 – REVUE DE LITTÉRATURE

2.1 - Introduction

La réalisation de cette revue de littérature permet de remarquer que les sujets les plus traités, dans le domaine des systèmes transitive (*ST*), se résument comme suit : la conception des parties physiques et commandes de ces systèmes, le prototypage et la simulation de leurs comportements, l'amélioration de leur robustesse et flexibilité, ainsi que l'optimisation de l'ordonnancement et des trajectoires des produits. Dans les études consacrées à l'amélioration de la robustesse des *ST*, les deux sujets qui reviennent le plus souvent sont : les méthodes de contournement de situations de blocages (*deadlock*) et d'évaluation des éléments les plus critiques au fonctionnement des *ST*. D'un autre côté, les *AGV* représentent les mécanismes de manutention automatisée les plus étudiés, dans la majorité de travaux de recherche. *M.M. Wong et al.* (2006) font pratiquement la même remarque, dans leur revue de littérature, en constatant que *la plupart de travaux de recherche concernant les systèmes automatisés de manutention flexibles sont effectués dans les domaines de la conception, de la commande, de l'optimisation et de la simulation du matériel, et l'application la plus commune est celles du domaine de production des semi-conducteurs (automated wafer fabs).*

Les sections subséquentes de cette revue de littérature présentent des travaux de recherche qui traitent, entre autres, des sujets similaires aux objectifs du présent projet, soit les aspects d'amélioration de la flexibilité et de la robustesse des systèmes automatisés de manutention. Les articles sont présentés et répartis selon les thèmes suivants :

- méthodes de décomposition des *ST* (sous-section 2.2.1), dans l'objectif d'améliorer leur flexibilité;
- efficacité des *ST* (sous-section 2.2.2);
- situations de blocage (sous-section 2.3.1);

- résistance aux pannes (sous-section 2.3.2);
- simulations des *ST* (sous-section 2.3.3).

2.2 - Flexibilité et efficacité des *ST*

A. K. Sethi et S. P. Sethi (1990) présentent un article consacré à la notion de flexibilité de différents systèmes. Ils définissent la flexibilité d'un système comme étant son adaptabilité à un éventail d'environnements possibles, qu'il peut rencontrer. Un système flexible doit être capable de changer afin de traiter un environnement en cours d'évolution. La flexibilité d'un système manufacturier est définie, par ces auteurs, comme étant sa capacité d'être reconfigurée, au niveau de ses ressources, pour produire efficacement différents produits avec des qualités acceptables. Dans ce même contexte, S. K. DAS (1996) présente la flexibilité d'un système ou d'un service en tant que sa capacité de s'ajuster sur des changements de son environnement interne ou externe.

2.2.1 - Méthodes de décomposition des *ST* (amélioration de la flexibilité)

Les méthodes de décomposition des *ST* à plusieurs niveaux hiérarchiques, font partie des méthodes les plus efficaces pour améliorer la flexibilité de ces systèmes. Cependant, ces méthodes sont peu traitées dans les travaux de recherche. Les paragraphes subséquents présentent quelques uns des rares travaux qui se sont penchés sur cet aspect des systèmes automatisés de manutention.

*P. Berruet et al. (2000 et 2001) proposent une méthode de décomposition des systèmes et de réutilisation des composants, dans l'application d'une méthode destinée à la conception des *ST*. Cette répartition s'effectue selon deux modèles, celui de la partie physique et celui de la partie commande. Les auteurs mentionnent, dans le cas de systèmes complexes, de la nécessité de segmentation du système en plusieurs ensembles et sous-ensembles étendus sur plusieurs niveaux hiérarchiques. Cette notion de décomposition n'est pas détaillée dans le développement de leur méthode. Elle consiste à réduire les temps de modélisation des *ST*, en se basant sur une structure réutilisable.*

En se basant sur les travaux des deux articles précédents, *C. Thierry et al. (2002)*, présentent une approche de conception et d'implantation des *ST*. Cette approche se base sur cinq éléments standards : le design, la modélisation, la validation, le prototypage et l'intégration. L'article se concentre sur les aspects de modélisation, validation et prototypage. Le premier élément consiste à modéliser l'environnement physique du système, qui est fragmenté en plusieurs niveaux composés à leurs tours de quatre éléments :

- la partie fonctionnelle représente les phénomènes physiques des composants du système, soit les éléments mécaniques, pneumatiques et hydrauliques ainsi que les différents caractéristiques de ces composants;
- les contraintes expriment les différentes fonctions qu'un composant peut exécuter, et ce qu'il exige des composants adjacents;
- l'élément de commande donne aux actions les ordres, dont la succession dépend immédiatement de l'action précédente ou directement d'un signal envoyé par un capteur;
- l'élément graphique permet d'afficher l'état des composants pendant la phase de simulation.

Avant de procéder à la simulation du comportement du système, une *analyse statique* est proposée par les auteurs, dans le cadre de la validation et du prototypage. Cette analyse permet d'évaluer la capacité des composants à répondre aux contraintes du système. Un composant validé est par la suite archivé pour être réutilisé ultérieurement. La seconde partie d'évaluation consiste à faire une *analyse dynamique* en utilisant un processus de simulation du système, les auteurs ont utilisés un logiciel appelé *SimSED*.

Dans un travail traitant la reconfiguration en ligne des *ST*, en tenant compte du matériel et des logiciels utilisés, *M.M. Wong et al. (2007)* présentent l'aspect de la décomposition des *ST* en plusieurs niveaux, qui peuvent être mis en arrêt indépendamment. Cela est réalisé dans l'objectif de faire une étude de niveau de disponibilité du système global. Ainsi, les auteurs considèrent deux principaux éléments : les *éléments dynamiques*

permettant le déplacement des produits et les *éléments statiques* entre lesquels les produits se déplacent.

La disponibilité des ressources de chaque élément, statique ou dynamique, peut être encore organisée selon trois niveaux. Ainsi la disponibilité d'un système est évaluée en fonction de la disponibilité de ces trois niveaux :

- système (*system level*) : l'arrêt ou le dysfonctionnement de cette catégorie a des répercussions sur tous les éléments du *ST*;
- sous-ensemble (*Group or subsystem level*) : l'arrêt d'un sous-ensemble n'affecte pas nécessairement tous les autres (en cas de problème dans l'un de ces éléments, le système peut continuer à fonctionner partiellement);
- ruelle ou plate-forme individuelle (*individual lane or deck level*) : c'est le niveau le plus bas, une plate forme en panne ne signifie pas que tout son sous-système doit être arrêté.

Les auteurs présentent aussi une évaluation du changement réversible du sens d'écoulement des produits dans le *ST* selon les trois niveaux cités ci-dessus. Cette opération permet d'évaluer la capacité du système de faire évacuer les produits qui s'y trouvent, en cas d'incident majeur.

Bien que ce troisième article utilise la notion de décomposition des *ST*, il présente une différence fondamentale par rapport aux deux premiers articles. En fait, ce travail fait recours à la notion de décomposition, pour évaluer le degré de disponibilité d'un système, dans le cas de dysfonctionnement de certains de ses ressources. D'un autre côté, les deux autres travaux utilisent la méthode de répartition des systèmes dans l'objectif de faciliter les procédures de conception.

2.2.2 - Efficacité des *ST*

Les travaux de recherche qui traitent de l'amélioration de l'efficacité des *ST* se répartissent sur deux grandes catégories : l'optimisation des trajectoires des produits, en trouvant les plus courts chemins pour les manutentionner, et l'optimisation des temps de déplacement, en minimisant les temps de livraison. La méthode des plus courts chemins peut se faire une seule fois pour chaque trajectoire, ou d'une manière dynamique selon les situations qui se présentent. Cette deuxième approche est utilisée dans les systèmes de manutention à trajectoires flexibles.

Dans le contexte de réduction des temps de livraison, *N. Bahri et al.* (2000) proposent un modèle de simulation qui emploie un algorithme de gestion de la logistique. Ce modèle permet l'amélioration de l'efficacité de manutention dans des *ST*. Les auteurs ont pu conclure que leur méthode permet de réduire de 30% les temps de déplacement entre les sources et leurs destinations.

Luo et al (2005) proposent une approche basée sur un algorithme de colonie de fourmis, pour trouver les chemins les moins coûteux pour la manutention des produits dans un environnement de production avec un système dynamique de manutention automatisée, Les colonies de fourmis ont aussi été utilisées par *Coudert et al.* (2003) pour l'optimisation des déplacements des produits par un *ST*.

Pour réduire les temps d'attente dus au blocage et à la non-disponibilité des ressources requises dans un système de production flexible (*SPF*), *S.S. Sankar et al.* (2004) ont proposé un programme qui permet de trouver un ordre dans lequel les produits doivent être introduits dans le système. Leur approche est basée sur une méta-heuristique qui fonctionne avec un procédé itératif. Le *SPF* étudié dans cet article est constitué d'une station entrée/sortie avec une capacité d'attente limitée permettant l'entrée et la sortie des produits du *SPF*, et de quatre unités de production flexible. Le dispositif de manutention flexible est sous forme d'un *AGV*. Les charges entrent par la station

d'entrée et quand toutes les opérations sont effectuées elles sortent par la station de sortie.

L'établissement du programme intégré est décomposé en deux problèmes secondaires et est approximativement résolu par un procédé itératif. Ce procédé itératif est basé sur les trois composants suivants :

- un algorithme méta-heuristique qui sert à produire les tâches et les programmes pour les postes de travail ;
- une analyse permettant l'évaluation des performances des programmes et de la répartition des tâches proposés à l'étape précédente. Cette opération est réalisée à l'aide d'un simulateur d'événement qui tient compte des contraintes globales du *SPF*, soit, le système automatisé de manutention et les postes de travail;
- une structure itérative qui sert de lien entre les deux premières phases et facilite la recherche d'une bonne solution.

Bien que le système de manutention étudié dans cet article est constitué uniquement d'*AGV*, l'approche proposée reste d'une grande utilité dans la mesure où elle peut être utilisée dans d'autres catégories de *ST* utilisant de différents équipements de manutention (convoyeurs, transporteurs...etc.).

Plusieurs autres travaux de recherche ont été effectués dans le domaine d'amélioration de l'efficacité des *ST*, en utilisant différentes méthodes : algorithmes génétiques, colonies de fourmis...etc. *M.M. Wong et al.* (2006) en présentent une revue de littérature assez détaillée.

2.3 - Réingénierie et robustesse des *ST*

Lors de conception ou la réingénierie d'un *ST*, la robustesse fait partie des qualités les plus importantes à prendre en considération. En fait, un *ST* doit être capable de continuer à exécuter ses tâches et fonctions, malgré qu'il rencontre certaines situations exceptionnelles de fonctionnement qui peuvent causer des blocages, ou s'il subit des pannes mineures. *K. Ali et al* (2003) définissent la robustesse comme étant [*le degré*

auquel un système peut fonctionner correctement en présence de circonstances différentes de celles assumées]. Selon, J. M. Carlson et J. Doyle (2002), la robustesse [garantit de garder certaines caractéristiques désirées d'un système en dépit des fluctuations dans le comportement de ses éléments ou de son environnement].

Dans ce contexte de définition de la robustesse, les deux sous-sections subséquentes (2.3.1 et 2.3.2) présentent quelques travaux de recherche ayant proposés des méthodes d'amélioration de cette caractéristique des *ST*. La première section présente des travaux qui traitent le problème de situations de blocage, alors que la seconde présente des méthodes permettant de maintenir le fonctionnement des *ST* malgré qu'ils rencontrent certaines anomalies de fonctionnement. Notons que la section 3.4 du chapitre 3 de ce mémoire compte des propositions pour surmonter ces deux catégories de problèmes.

2.3.1 - Situations de blocage (amélioration de la robustesse)

Un des problèmes les plus préoccupants et couramment rencontrés dans la conception des programmes de commande pour les *ST* est la situation de blocage. Cette catégorie de problèmes, causée principalement par des chevauchements dans les trajectoires suivis par les produits pendant leurs manutentions, peut causer des blocages locaux ou des perturbations allant jusqu'à l'arrêt total du système. C'est pourquoi un grand nombre de recherches se penchent sur ce sujet particulièrement important pour la robustesse des systèmes de manutention et de production flexible. Dans un article intitulé : *Design Guidelines for Deadlock-Handling Strategies in Flexible Manufacturing Systems*. M.A. Lawley et al. (1997) présentent une revue de littérature détaillée, couvrant la majeure partie des travaux qui ont traité ce sujet.

En analysant la littérature qui traite les problèmes de blocage, les études concernant les *AGV* représentent la majorité des travaux. Les cas qui étudient les *ST* dont les équipements de manutention sont basés sur des transporteurs et des convoyeurs sont moins nombreux. Tuan Le-Anh et M.B.M. De Koster (2006) présentent une revue de

littérature concernant les travaux de recherche qui ont traité les problèmes de blocage pour des systèmes de manutention utilisant les *AGV*.

La section subséquente de ce chapitre se concentre sur les travaux qui traitent des systèmes flexibles de manutention, dont les équipements ne sont pas composés seulement d'*AGV* ou qui ne comptent tout simplement pas ces équipements de manutention. En fait, les paragraphes ci-dessous présentent principalement des travaux traitant des *ST* qui utilisent des transporteurs et des convoyeurs dans leurs solutions de manutention. Cela est justifié par le fait que ces deux moyens de manutention représentent une des caractéristiques principales des *ST* étudiés dans le présent projet. Il est pertinent de noter qu'une des différences fondamentales entre les *AGV* et les transporteurs et convoyeurs se résume ainsi : pour les *AGV*, un segment peut contenir deux *AGV* qui se déplacent simultanément dans deux sens différents. Cependant, que les transporteurs et les convoyeurs ne peuvent pas offrir cette possibilité. En fait, ces éléments n'offrent aux produits manutentionnés qu'un seul sens de déplacement à la fois. Une autre caractéristique vient pour accentuer la différence entre ces deux moyens de manutention : les *AGV* qui se déplacent sur un même segment peuvent avoir des vitesses différentes, ce qui n'est pas le cas pour les transporteurs et convoyeurs qui offrent une vitesse identique pour tous les produits qu'ils manutentionnent simultanément.

N. Wu (1997) présente les situations de blocage comme étant [*des situations aux quelles le système risque de figer partiellement, à cause de trajectoires de quelques pièces, dans celui-ci*]. Cet article propose une méthode pour éviter ces situations, pour des systèmes de manutention basés sur l'utilisation d'un robot qui permet de saisir des pièces, les déplacer et les déposer dans des espaces d'attente dédiés à chaque machine du système. Le fonctionnement de cette méthode se base sur un modèle de réseau de *Pétri* combiné avec le réseau de *Pétri Ressource-orienté coloré* (CROPN), et permet d'éviter le blocage du système. Cela peut survenir lorsque le robot saisit une pièce à partir d'un poste de travail et ne peut pas, par la suite, la déposer à son poste de destination, à cause du fait

que son espace d'attente est saturé. La logique de cette méthode est basée sur la gestion des trois opérations de manutention exécutées par le robot, soit la saisie, le déplacement et le dépôt des pièces à leurs destinations. Les réseaux de *Pétri* sont aussi utilisés par *T.M. Cheng* (2004) où il propose une méthode pour prédire et éviter les situations de blocage. Cette méthode est basée sur des opérations de simulation exécutées d'une façon dynamique, dans des systèmes de production flexible. Par la suite, l'ordonnancement des tâches est géré en fonction de ces analyses, de façon à éviter les problèmes de blocage.

Une autre approche dynamique est proposée par *M.A. Lawley* (1999). L'auteur présente une méthode qui permet de détecter et de contourner les problèmes de situations de blocage, pour des systèmes de manutention à trajectoires flexibles. La méthode proposée est basée sur des procédures de contrôle informatique et des approches mathématiques qui garantissent au système d'éviter les situations de blocage. Les types de systèmes traités sont répartis selon la configuration des espaces d'attente consacrés aux produits :

- systèmes à simple capacité : chaque poste de travail a une capacité unitaire dans son espace d'attente (tampon);
- systèmes à capacité mixte : les postes de travail ont une capacité multiple dans leurs espaces d'attente;
- système avec un espace d'attente central, réutilisé par les produits à plusieurs reprises entre les opérations de traitement.

Un cas particulier de situation de blocage est présenté par *S. Bussmann et K. Schild* (2000), dans un système de manutention basé sur des convoyeurs et des transporteurs. Ces auteurs proposent une méthode de contournement de situations de blocage causées par la dépendance d'exécution des tâches entre les machines. En fait, ces problèmes se présentent dans le contexte suivant : soit deux machines *M1* et *M2* dotées successivement de deux espaces tampon d'attentes à la sortie : *w1* et *w2*. En considérant que la sortie de chacune de ces machines ne peut servir que l'autre (*w1* sert *M2* et *w2* sert *M1*), la situation de blocage survient lorsqu'aucune d'entre elles n'est disponible pour recevoir de nouveaux produits à traiter. Pour éviter ces situations, les auteurs

proposent une méthode basée sur la communication entre les machines. En fait, chacune d'entre elles doit envoyer, d'une façon continue, des messages contenant les tâches qu'elle est prête à exécuter, avec un avertissement de sa non disponibilité dans le cas échéant.

Ces mêmes auteurs (*S. Bussmann et K. Schild.*) (2001) présentent un cas pratique d'un système de production flexible réalisé par la compagnie *Daimler Chrysler*. L'usine est constituée principalement de machines-outils à commande numérique (MOCN). Chacune de ces machines est équipée de trois convoyeurs : (déplacement vers l'avant, vers l'arrière et un convoyeur d'approvisionnement) et de deux espaces d'attente, l'un pour l'entrée et l'autre pour la sortie de la machine. Un produit est déplacé par le convoyeur *vers l'avant* jusqu'à ce qu'il atteigne l'espace d'attente d'entrée de sa machine de destination. Il est alors déplacé par une table de décalage au convoyeur d'approvisionnement de celle-ci. Le produit est récupéré, traité par la machine et remis sur le *convoyeur d'approvisionnement* à travers l'espace d'attente de la sortie. De là, il est manutentionné vers une seconde *table de décalage* qui le transfère au *convoyeur vers l'avant* ou *en arrière*, selon l'emplacement de sa prochaine machine. Les produits sont fixés sur des palettes où ils restent jusqu'à ce que tous les traitements soient complétés. Ces palettes sont identifiées par un numéro d'identification qui est lu devant chaque table de décalage et chaque machine, pour permettre de télécharger le programme d'usinage correspondant.

La gestion d'orientation des produits est basée sur la communication entre leurs éléments d'identification et les programmes de commande des postes de travail. Ces éléments d'identification assurent un suivi, en temps réel, de l'état de traitement de celui-ci. Le choix de la destination d'un produit se fait au plus tard lorsqu'il quitte sa dernière machine de traitement, en lançant un appel mentionnant l'opération suivante qu'il doit subir. Les machines reçoivent le message et offrent leurs disponibilités à faire partiellement ou complètement la tâche, pour permettre ainsi au programme de contrôle de faire l'orientation du produit en question. Les problèmes de blocage sont présentés

dans ce travail sous la forme suivante : présence de deux produits dans le *ST*. Ces produits doivent quitter leurs postes de travail actuels, et chacun a comme destination la machine sur laquelle l'autre produit vient de finir de se faire traiter. La méthode proposée pour contourner ce problème se limite à accorder la priorité au sens de déplacement qui correspond à la direction principale du flux de la matière dans la chaîne de production.

Dans un autre travail qui traite un système à base de transporteurs et convoyeurs, *P. Valckenaers* et *H.V. Brussel* (2003) présentent une méthode permettant de détecter et d'éviter les situations de blocage, en utilisant une analyse dynamique du système, qui permet de donner des instructions au programme de commande. La méthode consiste à présenter le réseau de manutention sous forme d'un ensemble de nœuds et d'arcs. Les nœuds représentent les postes de travail et les produits, tandis que les arcs représentent les segments physiques des trajectoires et les portions de chemins prévues. Un modèle est élaboré par la suite pour éviter tout blocage possible en établissant des règles de configurations associées au réseau en question. Le système étudié par cet article est en boucle fermée et comporte les éléments de manutention suivants :

- transporteurs longitudinaux unidirectionnels;
- transporteurs latéraux unidirectionnels et bidirectionnels;
- tables tournantes;
- élévateurs;
- systèmes d'entreposage automatisé (AS/RS);
- unités de traitement.

2.3.2 - Résistance aux pannes

Un *ST* robuste doit être capable de continuer à remplir ses fonctions malgré la présence de problèmes de fonctionnement au niveau de certaines de ses ressources. La présente section présente quelques travaux qui traitent l'amélioration de cet aspect de robustesse.

Coudert et al. (2003) présentent une méthode permettant l'optimisation des déplacements sur un *ST* en se basant sur un algorithme de colonies de fourmis. En cas d'un dysfonctionnement d'une partie du système, l'algorithme proposé, permet de trouver une alternative de chemin à emprunter par les produits. L'algorithme utilise un procédé de mise à jour de la traînée de phéromone (substance produite par les fourmis pour marquer leur chemin de passage) générée par le déplacement des produits (fourmis). Il permet, par la suite, de déposer une quantité plus élevée de phéromones sur les arcs appartenant aux plus courts chemins. Par conséquent, les chemins qui ont les plus faibles temps d'attente et les plus courtes durées deviennent plus attrayants pour les autres fourmis. Dans le cas où un produit rencontre une situation de blocage, les informations correspondantes à sa trajectoire sont annulées, pour éviter que d'autres produits empruntent ce même itinéraire. Bien que cet article présente une approche prometteuse, l'exemple d'application utilisé ne met pas en évidence son efficacité. Cela est dû à la grande simplicité de l'exemple en question, qui ne présente pas assez de défis pour pouvoir évaluer l'efficacité de la méthode proposée.

Dans le même objectif d'amélioration de la robustesse des *ST* en augmentant leur résistance aux pannes, *A. Beschorner* et *D. Glüer* (2003) proposent une méthode appelée *MaxFlow*. Celle-ci permet de déterminer la disponibilité des éléments d'un système pour évaluer par la suite la disponibilité restante à celui-ci si un de ses composants tombe en panne. La disponibilité d'un système est déterminée en calculant de combien l'écoulement maximal du réseau change en raison des anomalies. Cette approche est, par la suite, appliquée à un système automatisé de manutention de semi-conducteurs, afin de détecter ses composants les plus critiques.

2.3.3 - Simulations des *ST*

Les opérations de réingénierie des *ST* font appel, dans la plupart des cas, à la simulation avant de procéder à l'implantation d'un système quelconque. Ces opérations servent aussi à évaluer un système déjà existant pour une éventuelle amélioration. La simulation

est généralement utilisée pour les systèmes complexes dans l'objectif de réduire les temps de conception, prédire d'éventuels dysfonctionnements des systèmes et évaluer leurs performances. *F.K. Wang et J.T. Lin (20003)* présentent dans leur article intitulé *Performance evaluation of an automated material handling system for a wafer fab*, une revue de littérature assez détaillée des travaux antérieurs qui traitent le sujet d'évaluation de performance des *ST* en utilisant diverses méthodes de simulation. Dans cet article, les auteurs proposent aussi une méthode d'évaluation des *ST* utilisés dans l'industrie de la production de semi-conducteurs. Ces systèmes de manutention sont composés principalement de plateaux contenant les produits, de transporteurs convoyeurs, de transtockeurs et d'*AGV*. L'analyse effectuée par simulation a permis de déterminer que le nombre de plateaux utilisés dans le système influence significativement la rentabilité de celui-ci. Cette vérification est réalisée en se basant sur une analyse, par simulation, des temps de livraison et d'attente des produits dans le système.

Pour permettre la réduction du temps de conception, *J.S. Mouchard et al. (2000)* présentent, dans leur article intitulé *Modeling, simulation and validation : an application to the design of transitic systems*, un outil appelé *SimSED*. Ce logiciel permet de tester et de valider le code de commande des *ST*, avant leurs mises en œuvre. Cette opération s'exécute avec une simulation conjointe de la partie opérative du système, dans un environnement virtuel qui offre une visualisation 3D du *ST*.

K. Eugene et al. (2004) utilisent la simulation pour prévoir le comportement des *ST* en fonctionnement normal et en cas de dysfonctionnement dans l'objectif d'améliorer leur flexibilité. Cela permet de faire la sélection d'une meilleure configuration. Ces auteurs proposent une méthodologie permettant aux concepteurs d'établir des modèles qui examinent l'étape de décision du processus de reconfiguration. Leur travail se concentre sur les stratégies **actives** envers les anomalies. Ces stratégies sont basées sur la détection des défauts et l'utilisation des algorithmes d'isolement (*Fault detection and isolation (FDI) algorithms*), faisant recours à des méthodes de *simulation réflexives* et de *Nested simulation*.

2.4 - Conclusion

Cette revue de littérature a présenté les principaux domaines de recherche actifs concernant le domaine des *ST*. Ce chapitre s'est concentré tout particulièrement sur les deux éléments traités dans le présent mémoire, soit l'amélioration de la flexibilité et de la robustesse des *ST*.

Cette revue de littérature a présenté des travaux de recherche qui traitent de la réduction des temps de conception et de réingénierie des *ST* et permettent de faciliter ces deux opérations. Dans cet objectif et pour améliorer la flexibilité des *ST*, certains de ces travaux utilisent des méthodes de décomposition de ces systèmes, aux niveaux physique et commande (sous-section 2.2.1). Cette méthode va être réutilisée avec de nouvelles approches dans les méthodes proposées à la sous-section 3.3.1. En ce qui concerne la robustesse, cette revue de littérature présente principalement les travaux de recherche qui proposent des méthodes destinées à éviter les problèmes de blocage et les arrêts des systèmes causés par le dysfonctionnement de leurs éléments critiques. La section 3.4 propose de nouvelles méthodes destinées à éliminer des deux sources de réduction de la robustesse des *ST*, soit les situations de blocage et les arrêts des systèmes.

CHAPITRE 3 – CONCEPTS ET MÉTHODES PROPOSÉS

3.1 - Introduction

Le présent chapitre porte sur les différentes méthodes proposées pour améliorer la flexibilité et la robustesse des *ST*. La deuxième section de ce chapitre présente la méthodologie utilisée, ainsi que les catégories des *ST* faisant le sujet de ce mémoire. Les méthodes proposées pour améliorer l'efficacité des *ST* sont présentées à la section 3. La quatrième section, quant à elle, énumère et explique les différentes gammes de production traitées et présente les méthodes proposées pour améliorer la robustesse des *ST*. Ces méthodes consistent à diagnostiquer et éviter les situations de blocage, et de proposer une méthode de gestion d'orientation des produits. Celle-ci est utilisée dans le cas d'utilisation multiple d'un ou plusieurs postes de travail dans la même gamme de production (sous-section 3.4.5). La conclusion représente la 5^e et dernière section de ce chapitre.

3.2 - Méthodologie

3.2.1 - Contexte

Les concepts proposés dans ce mémoire sont adaptés à des *ST* ayant les caractéristiques suivantes :

- manutention des produits basée sur l'utilisation des transporteurs et des convoyeurs ;
- possibilité d'avoir des files d'attentes aux postes de travail : les espaces réservés aux files d'attente peuvent être situés sur le transporteur, en amont des postes, ou sur des espaces tampon localisés à proximité de chacun des postes de travail ;
- possibilité de contourner les postes de travail via des stations de transfert et des transporteurs de contournement;
- circuit de manutention linéaire (figure 3.1);
- circuit de manutention en forme de U (figure 3.2);

- circuit de manutention en boucle fermée (figure 3.2).

Les concepts proposés dans le présent travail ne sont pas destinés à des *ST* convergents, divergents ou à base d'*AGV*.

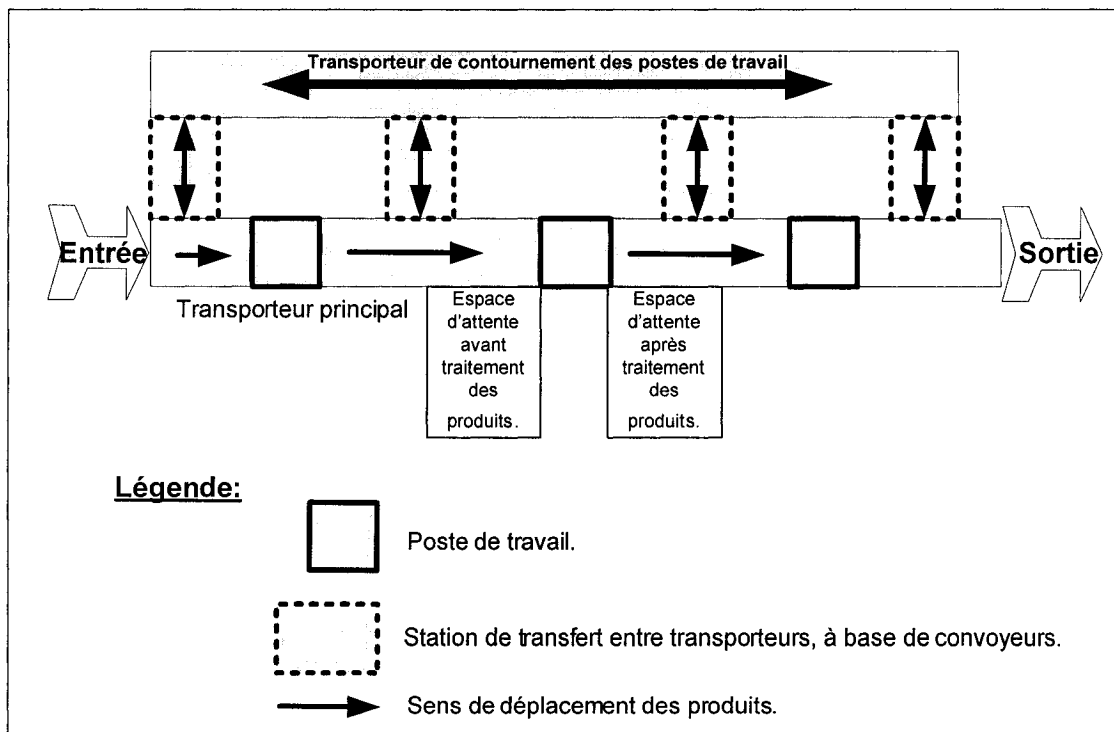


Figure 3. 1. Chaîne de manutention linéaire

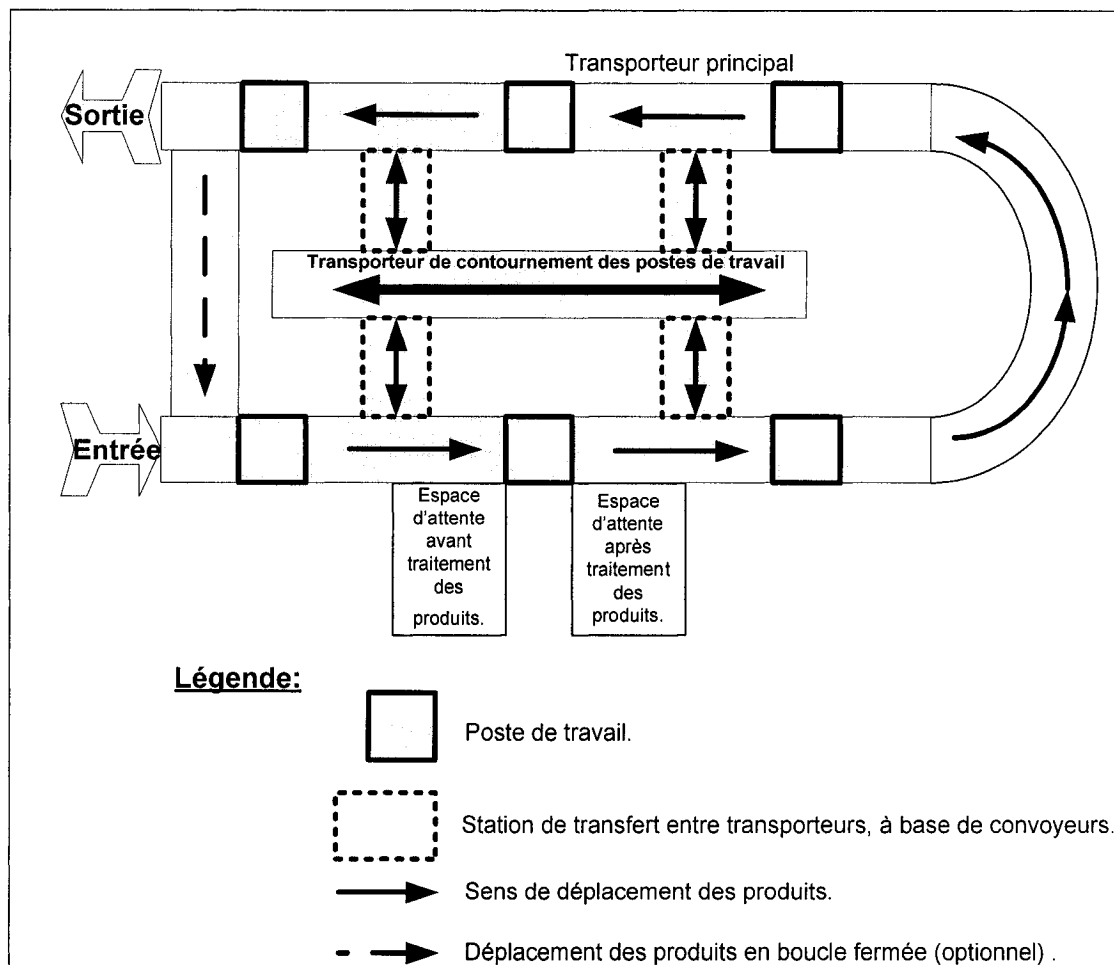


Figure 3. 2. Chaîne de manutention en forme U et boucle fermée

3.2.2 - Étapes de la méthodologie

La première étape de la méthodologie est exécutée dans l'objectif d'améliorer la flexibilité du *ST*. Elle consiste à faire une décomposition physique de celui-ci à plusieurs niveaux hiérarchiques, suivis d'une décomposition logique au niveau des programmes de commande.

En second lieu, plusieurs modes de fonctionnement du *ST* sont proposés dans l'objectif d'améliorer son adaptabilité à différentes catégories de production.

La troisième étape consiste à l'amélioration de la robustesse des *ST* en offrant une méthode qui permet de détecter la possibilité de situations de blocage et propose une méthode pour éviter ces situations, dans le cas échéant.

Toujours dans le cadre d'amélioration de la robustesse des *ST*, la quatrième étape consiste à vérifier la présence d'utilisation multiple d'un poste de travail dans la même gamme de production, pour proposer une méthode permettant une bonne orientation des produits quittant les postes de travail à utilisation multiple, dans le cas échéant.

Quatre produits sont alors résultants de ce travail de recherche.

Pour améliorer la flexibilité *ST* :

- une méthode de décomposition physique et logique des *ST*;
- plusieurs modes de fonctionnement adaptés aux types de production.
- Pour améliorer la robustesse des *ST* :
- une méthode pour localiser et éviter les situations de blocage;
- une méthode pour orienter correctement les produits dont la gamme utilise un poste de travail à multiple reprise.

3.3 - Amélioration de la flexibilité d'un *ST*

Pour améliorer la flexibilité d'un *ST* et faciliter la réalisation de ses programmes de commande, il est pertinent de suivre la logique de *décomposition*. On entend par décomposition la fragmentation « physique et logique » du système sur plusieurs niveaux hiérarchiques. Bien que cette notion de décomposition a été abordée par *Berruet et al. (2000)*, *Thierry et al. (2002)* et *Wong et al. (2006)*, nous proposons dans ce travail une méthode plus élaborée qui est axée sur la réduction de temps de conception de programmes de commande. Les structures de programmation utilisées sont adaptées au GRAFCET. La méthode proposée est basée principalement sur les éléments suivants :

- introduire plus de niveaux hiérarchiques, ce qui offre plus de flexibilité dans l'aspect commande du *ST*;
- utiliser une décomposition physique et une autre logique;

- produire un sous-programme pour chaque segment de trajectoire utilisant plus qu'une unité de travail (voir la sous-section 3.3.1). Ces programmes représentent l'avantage d'être réutilisables.

3.3.1 - Décomposition physique

La décomposition physique consiste à répartir physiquement les composants du *ST*, selon plusieurs niveaux hiérarchiques. Cette opération est effectuée selon la fonction de chacun de ces éléments.

Quatre niveaux hiérarchiques sont définis à la décomposition physique (figure 3.3). Le paragraphe ci-dessous, en donne les définitions :

- *installation opérationnelle* : un ensemble d'unités de travail qui permettent d'effectuer une ou plusieurs tâches;
- *unité de travail* : un ensemble d'éléments qui permettent d'effectuer une ou plusieurs tâches (station de transfert, poste de travail);
- *élément d'unité* : une entité qui permet de faire une action élémentaire (vérin, capteur, moteur électrique);
- *composant d'élément* : ce sont les pièces qui rentrent dans la composition d'un élément d'unité. Un composant n'exécute pas nécessairement une tâche liée au *ST*, il sert plus au fonctionnement de l'élément qui le contient (piston, cylindre, rotor d'un moteur électrique).

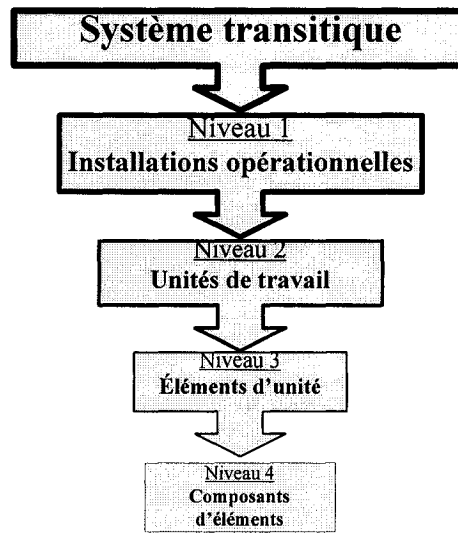


Figure 3. 3. Décomposition physique d'un ST

Cette décomposition permet de bien répertorier le système pour faciliter sa reconfiguration, son amélioration ou son extension, en ajoutant au ST des nouvelles ressources de niveau supérieur, soit une installation opérationnelle ou une unité de travail.

En ayant cette maîtrise de la fonctionnalité de chacune des types de ressources, une grande facilité est offerte à la réingénierie des ST. Cela se manifeste par la possibilité offerte aux concepteurs de pouvoir réutiliser en duplicata, avec des modifications mineures, les ressources et leurs programmes de commande.

3.3.2 - Décomposition logique

Pour faciliter et accélérer les processus de réalisation des programmes de commande du système, une décentralisation de ces programmes est nécessaire. Ainsi, chaque *unité de travail* aura son propre programme de commande qui peut être activé ou désactivé séparément. Pour assurer l'efficacité et la synchronisation de fonctionnement du système, il faut établir un dispositif de communication entre les programmes des *unités de travail* qui appartiennent à une même *installation opérationnelle*. La conception des programmes de commande des unités de travail de même catégorie se base sur un

programme type qui va être testé et validé. Il sert, par la suite, à la réalisation des programmes des autres unités de travail semblables.

Cette décomposition logique présente les avantages suivants :

- dans le cas où le *ST* contient plusieurs unités de travail identiques ou similaires, la duplication du même programme de commande sera d'une grande utilité en matière de gain du temps et de facilité de déverminage en cas d'anomalies;
- le fait que chaque unité de travail a son propre programme rend le système moins vulnérable aux pannes. Par conséquent, si une unité rencontre des anomalies de fonctionnement ou tombe en panne, cela ne va pas engendrer un arrêt total du système, à condition que cet élément ne soit pas vital pour le fonctionnement de celui-ci. Uniquement le programme de commande de l'unité défaillante va être neutralisé. Ainsi le système peut continuer à fonctionner en mode dégradé ou en utilisant un programme alternatif qui permet d'exécuter la même gamme de production sans avoir recours à la ressource en difficulté. Ainsi, la réparation de l'unité en question ne va pas être un obstacle majeur au fonctionnement normal du système.

Dans le même ordre d'idées, nous proposons l'utilisation de sous-programmes appelés *programmes de transfert*. Ces derniers sont dédiés à la commande des segments d'une trajectoire donnée, entre deux postes de travail, ou entre un poste et la sortie du système. Un segment n'a son propre programme de transfert que s'il recourt à plusieurs unités de travail. Ainsi, chaque segment aura son propre programme qui peut être exécuté à chaque fois que le système de commande en a besoin. Cette façon de faire permet de faciliter la réalisation des programmes de commande et offre un important gain de temps grâce à la réutilisation des sous-programmes. En fait, le sous-programme d'un segment de trajectoire peut être réutilisé (avec *copier/coller*) dans n'importe quelle autre gamme de production ayant recours à celui-ci.

3.3.3 - Modes de fonctionnement du *ST*

Pour améliorer l'adaptabilité du *ST* à plusieurs types de production, nous proposons trois modes de fonctionnement.

1. *Mode manuel* : c'est un mode de fonctionnement dégradé, destiné à être utilisé dans le cas de dysfonctionnement majeur des éléments de contournement des postes de travail. Ce mode de fonctionnement est présenté au chapitre 6.
2. *Mode semi-automatique* : destiné pour la production en série ou les modes de production par lots, en prévoyant un ou des programmes pour chaque gamme de production. Le chapitre 5 présente en détail ce mode de fonctionnement.
3. *Mode automatique* : destiné pour l'exécution des gammes complexes de production. Une gamme est dite complexe lorsque la trajectoire de celle-ci compte beaucoup de retours en arrière et d'utilisation multiple de postes de travail. Le mode automatique est utilisé aussi pour la production simultanée de plusieurs types de produit avec différentes gammes.

Chacun de ces modes comprend un système de supervision qui permet de faire un suivi, en temps réel, de l'évolution d'exécution des programmes de commande. Ce système permet aussi de visualiser le déplacement des produits dans le *ST* et offre des informations pertinentes concernant les files d'attente des postes de travail, le nombre des produits introduits dans le système ainsi que le nombre total des unités produites depuis le début d'exécution d'une gamme de production.

L'organigramme illustré à la figure 3.4 présente la méthode de choix du mode de fonctionnement selon le type de production et la complexité des gammes de production.

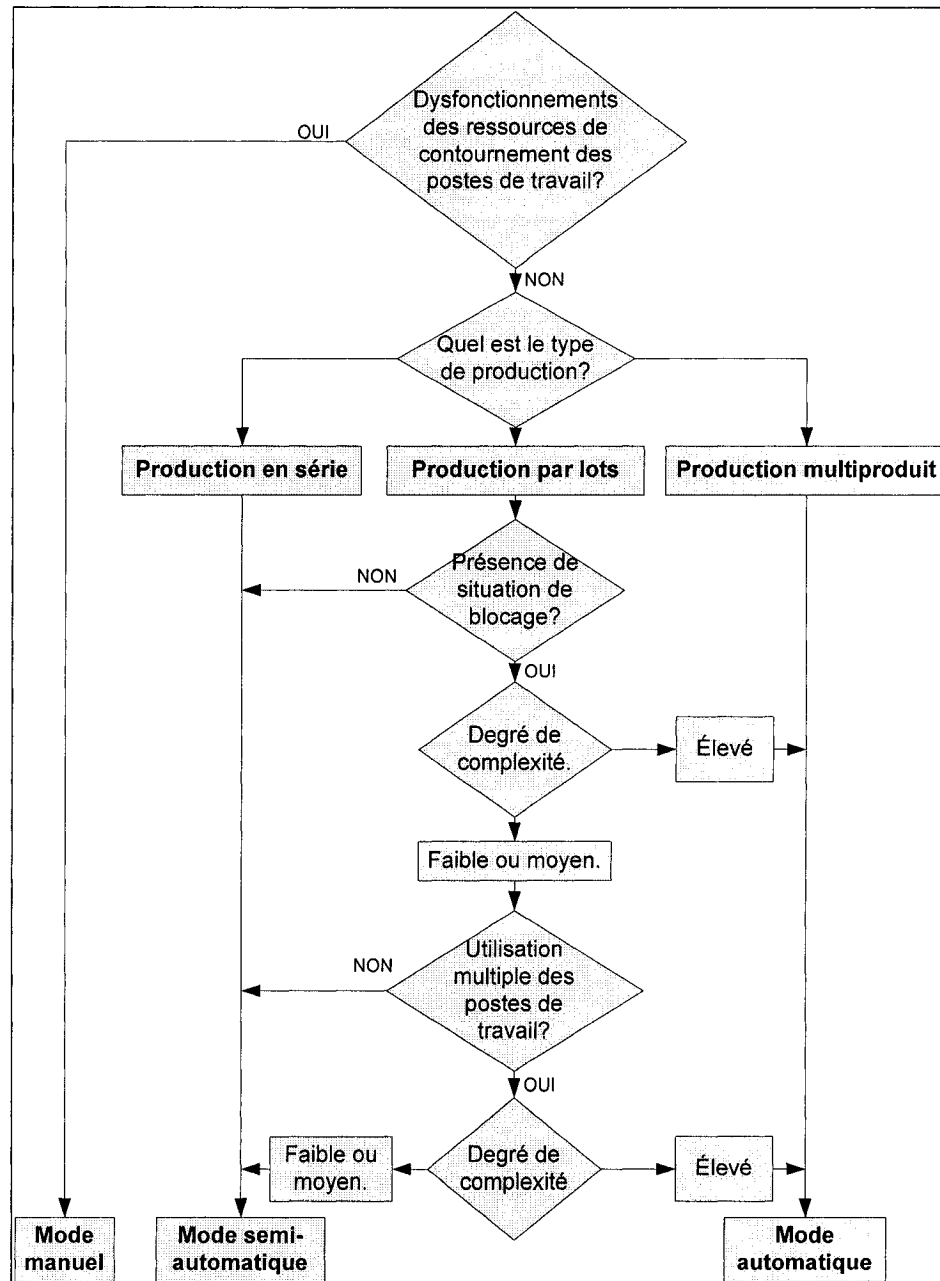


Figure 3. 4. Méthode de sélection du mode de fonctionnement d'un ST

3.4 - Amélioration de la robustesse d'un ST

Pour s'assurer du bon fonctionnement des unités de travail du ST, un *programme test* est utilisé (chapitre 4). Il permet l'exécution d'une gamme de production, faisant en sorte de tester le bon fonctionnement de tous les capteurs et actionneurs du système. Ce

programme doit être exécuté d'une manière systématique dans le cadre des opérations de maintenance préventive.

Un *ST* flexible est caractérisé principalement par sa robustesse (définition : à la section 2.3). En d'autres mots, le système doit continuer à fonctionner malgré qu'une ou plusieurs anomalies l'affectent (*résistance aux pannes*) ou en présence de circonstances exceptionnelles (*situations de blocage*). Les sous-sections 2.3.1 et 2.3.2 de la revue de littérature présentent un ensemble de travaux réalisés dans l'objectif d'améliorer la robustesse des *ST*. Coudert et al. (2003) présentent une méthode **dynamique** qui permet de trouver, en cas d'anomalies, une alternative de trajectoire à emprunter par les produits.

Dans ce même objectif, la sous-section 3.4.1 propose une méthode **statique** pour trouver des trajectoires alternatives dans l'objectif d'améliorer la robustesse des *ST* en améliorant leur résistance aux pannes. Cette approche est basée sur l'utilisation des *programmes alternatifs*, conçus a priori, qui permettent d'assurer la continuité de fonctionnement du système malgré le dysfonctionnement de certaines de ses ressources. En fait, un programme alternatif permet d'exécuter la même gamme de production de son programme initial en utilisant des ressources différentes. Cette différence entre les ressources dépend des trajectoires empruntées pour exécuter la gamme en question. Cependant, le système ne peut pas se passer de certaines ressources, considérées comme éléments-clés de celui-ci. Pour prévenir les pannes de ces ressources clés, une analyse permettant leur localisation s'avère indispensable. Dans ce contexte, l'application des notions de décentralisation physique va servir à localiser les ressources dont le dysfonctionnement peut provoquer des **arrêts majeurs ou totaux** du système (*entités vitales*). Une approche quantitative a été proposée par A. Beschorner et D. Glüer (2003) pour évaluer l'impact de dysfonctionnement d'un élément sur l'ensemble d'un système. Leur méthode consiste à déterminer la disponibilité des composants d'un système pour évaluer la disponibilité restante à celui-ci si un de ses composants tombe en panne.

I. Boyer (2004) présente dans son mémoire de maîtrise une méthodologie bien détaillée pour évaluer la criticité des composants de systèmes automatisés. L'application de cette analyse au *ST* permet d'identifier ses ressources vitales. Après la détermination de ces ressources et l'analyse des cadences de leurs utilisations, un programme de maintenance préventive doit être établi en se basant sur les résultats obtenus. Le tableau 3.1 sert à résumer des informations cruciales pour l'établissement des programmes de maintenance. Cela permet d'éviter des arrêts totaux du système, qui peuvent surgir à cause du dysfonctionnement des éléments critiques.

Tableau 3. 1. Identification de la criticité des ressources d'un *ST*

Type d'entité	Inconvénients de dysfonctionnement de l'entité	Cadences d'utilisation	Criticité

Légende :

Type d'entité : un des quatre niveaux hiérarchiques de la décomposition du *ST* (installation opérationnelle, unité de travail, élément d'unité ou composant d'élément).

Inconvénients de dysfonctionnement de l'entité : cette case présente les répercussions générées par une anomalie au niveau de l'entité en question.

Cadences d'utilisation : cette case doit contenir la cadence moyenne d'utilisation par unité de temps relative à l'entité en question.

Criticité : un coefficient accordé à chacune des ressources, en fonction des conséquences générées par le dysfonctionnement de celle-ci. Le degré accordé à une entité est proportionnel à l'importance de celle-ci par rapport au fonctionnement global du *ST*.

L'établissement des programmes efficaces de maintenances préventives permet d'améliorer l'aspect physique de la robustesse des *ST* en évitant le dysfonctionnement

mécanique de ses éléments critiques. L'amélioration de l'aspect logique de la robustesse, quant à elle, dépend des catégories de gammes de production. En fait, deux types de gammes sont définis : les gammes avec ou sans retour en arrière. Les sous-sections subséquentes présentent les catégories des gammes de production et les méthodes d'amélioration de la robustesse des programmes de commande correspondants. Ces gammes de production sont destinées à la production de plusieurs pièces et non à la production unitaire.

3.4.1 - Gammes de production sans retours en arrière

Pour une gamme sans retour en arrière, l'ordre des postes de travail respecte l'ordre de leurs emplacements (le passage du poste P1 vers P2 est considéré sans retour en arrière, tandis que de P2 vers P1 est un retour en arrière). Cette catégorie de gammes ne représente jamais de situation de blocage car les produits circulent toujours en suivant un seul sens (le sens normal du flux du *ST*). Deux variantes de programmes sont proposées.

1- programme initial (peut utiliser la voie directe): seul les postes de travail dont la visite cause une augmentation de la distance parcourue par les produits sont contournés. À titre d'exemple, la figure 3.5 illustre la trajectoire suivie par les produits, en utilisant le programme initial de la gamme de production P1 – P4 – P5.

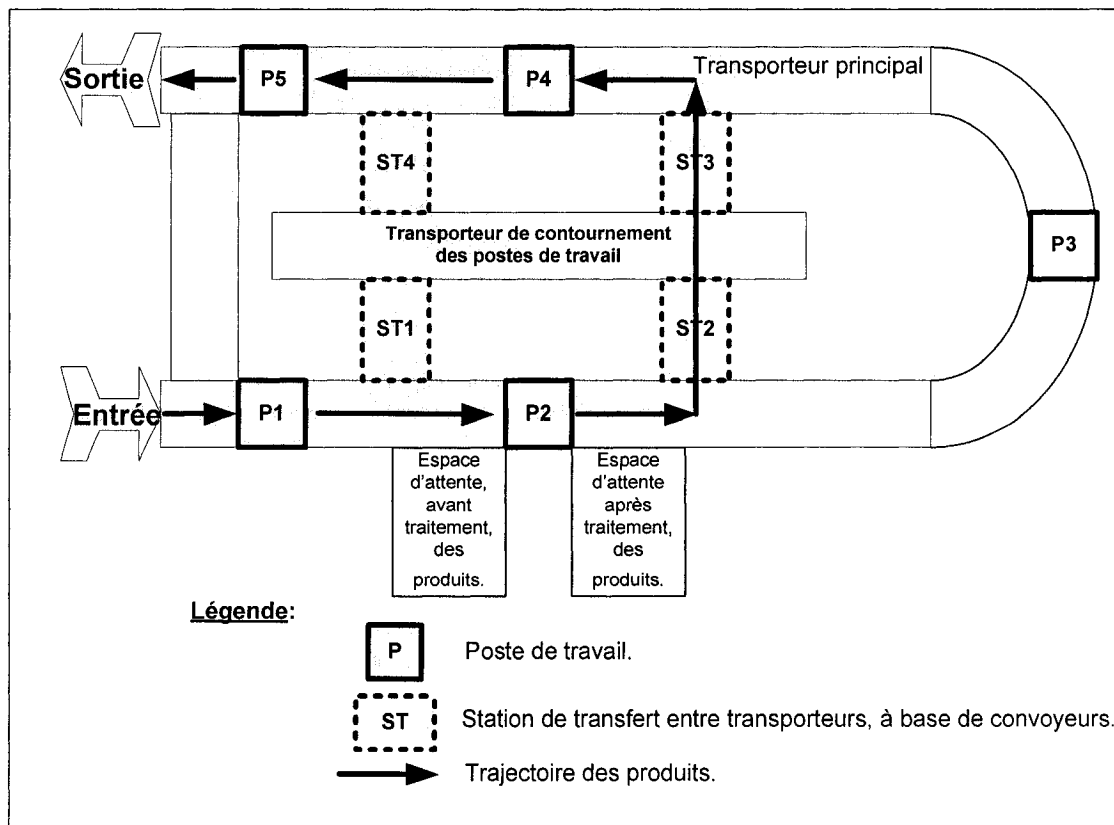


Figure 3. 5. Trajectoire du programme initial de la gamme de production P1 - P4 - P5

Dans cette trajectoire, on peut remarquer qu'uniquement le poste de travail P3 est contourné. Cela est en raison qu'il ne fait pas partie de la gamme de production, et le fait que si les produits le visitent, cela augmenterait considérablement et inutilement leurs distances parcourues. Notons que les produits passent par le poste de travail P2 sans s'y arrêter, malgré que celui-ci ne figure pas dans la gamme de production. Cela est justifié par le fait que son contournement ne réduit ni la distance parcourue ni le temps de manutention des produits. Cependant, cette option de contourner P2 reste envisageable, dans le cas où ce poste de travail a besoin de subir des opérations de maintenance sans affecter le fonctionnement du système. Dans une telle situation, un deuxième programme, dit *alternatif*, est proposé pour éviter que les produits passent par P2. Le paragraphe ci-dessous présente cette catégorie de programme.

2- programme alternatif (avec contournement) : dans cette deuxième catégorie de programmes, tous les postes de travail qui ne figurent pas dans la gamme de production sont contournés, malgré que cela ne réduit pas les distances parcourues par les produits. Ces programmes sont utilisés comme une option alternative pour les programmes initiaux car ils sont généralement plus lents à cause des opérations de contournement des postes de travail qu'ils exécutent. La figure 3.6 illustre la trajectoire suivie par les produits en utilisant le programme alternatif de la gamme de production P1 – P4 – P5.

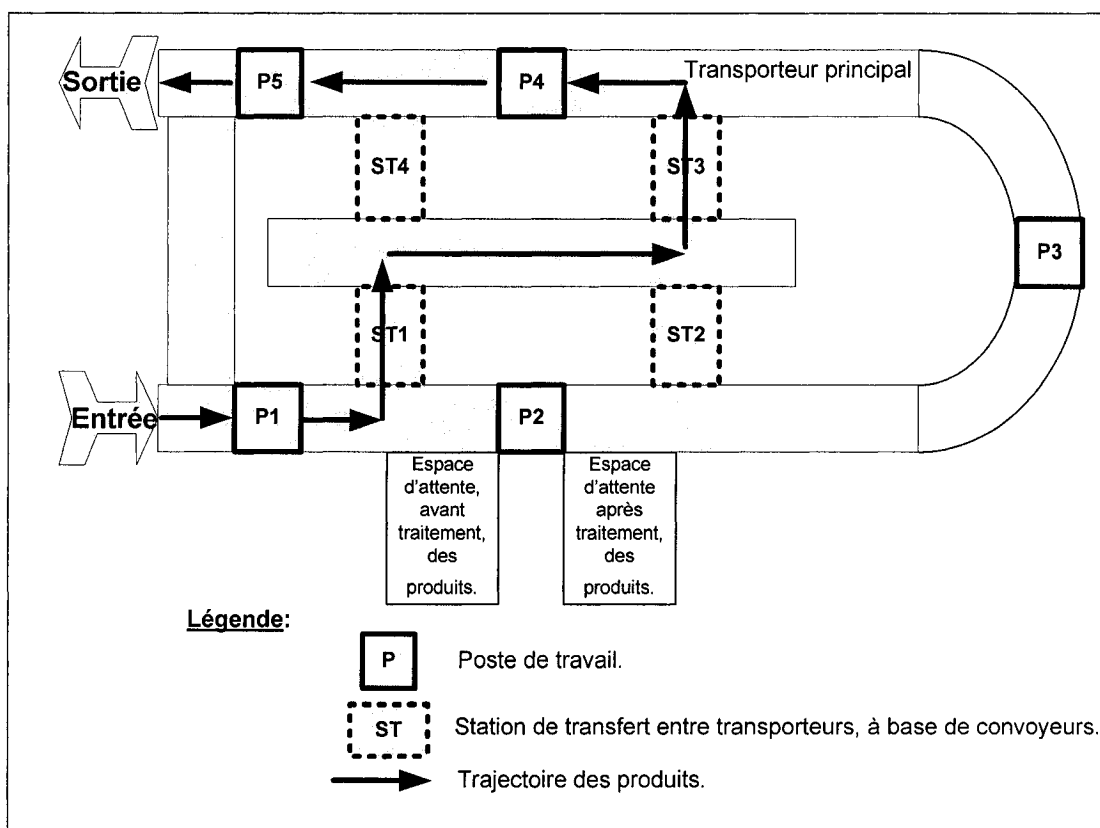


Figure 3. 6. Trajectoire du programme alternatif de la gamme de production P1 - P4 - P5.

Chacun des deux programmes (initial ou alternatif) utilise quelques ressources différentes de l'autre. Dans le cas où une des ressources utilisée uniquement par l'un des deux programmes rencontre des problèmes de fonctionnement ou nécessite une intervention de maintenance préventive, l'autre programme peut prendre la relève en utilisant la même gamme de production. Pour mettre en évidence cette notion, le tableau

3.2 présente les ressources utilisées par chacun des deux programmes de la gamme P1 – P4 – P5.

Tableau 3. 2. Ressources utilisées par chacun des programmes de la gamme P1-P4-P5

Ressources utilisés par le programme initial	Ressources utilisés par le programme alternatif
- Transporteur principal - Postes de travail P1, P2, P4 et P5 - Station de transfert ST2 - Station de transfert ST3	- Transporteur principal - Transporteur de contournement des postes de travail - Postes de travail P1, P4 et P5 - Station de transfert ST1 - Station de transfert ST3

En analysant le tableau 3.2, on peut remarquer que certaines ressources sont utilisées uniquement par l'un des deux programmes (écrites en gras/italique). En fait, le transporteur de contournement des postes de travail et la station de transfert ST1 sont utilisés seulement par le programme alternatif alors que la station ST2 et le poste de travail P2 sont utilisés par le programme initial. Ainsi, l'exécution de la gamme de production peut toujours se faire malgré que certaines de ces quatre ressources ne soient pas disponibles. La non disponibilité de ST1 ou du transporteur de contournement des postes de travail, ou même des deux, est surmontée par l'utilisation du programme initial. Le programme alternatif est utilisé dans le cas où ST2 ou P2 n'est pas disponible.

3.4.2 - Gammes de production avec retours en arrière

Pour une gamme de production de plusieurs pièces avec retour en arrière, les trajectoires des produits contiennent des déplacements qui ne sont pas dans l'ordre croissant des postes de travail.

Exemple: P1 - P4 – P3. Dans cette gamme de production on peut constater le retour en arrière causé par le passage du poste P4 au poste P3.

Ces gammes de production représentent dans la majorité des cas des problèmes de **blocage** qui se manifestent généralement à cause de sollicitations simultanées de plusieurs opérations de transfert entre postes de travail dont les trajectoires entrent en conflit. Ces conflits se traduisent par des chevauchements entre deux ou plusieurs trajectoires au niveau d'une même ressource du système qui sera sollicitée pour exécuter des déplacements dans deux sens opposés. Cette catégorie de problèmes bloque l'exécution du programme de commande du système.

La figure 3.7 illustre une situation de blocage entre deux produits (PR1 et PR2) : PR1 quittant le poste de travail P5 à destination de P4 et PR2 quittant le poste de travail P1 à destination de P3. Dans cette situation, deux *programmes de transfert* sont utilisés : un pour exécuter le transfert du produit PR2 à partir de P1 vers P3, en empruntant les segments S1, S2 puis S3. Un 2^e programme de transfert s'occupe de manutentionner PR1, de P5 vers P4 en empruntant les segments S10, S11 et S12. Ces deux programmes ne doivent pas s'exécuter simultanément, car ils ont deux segments qui sollicitent le transporteur de contournement des postes de travail à faire deux déplacements opposés : soit de l'est vers l'ouest (pour déplacer PR1 sur le segment S11) et de l'ouest vers l'est (pour déplacer PR2 sur le segment S2). Par conséquent, pour éviter un tel problème, il faut gérer les priorités d'autorisation d'exécution des programmes de transfert (sous-section 3.4.4).

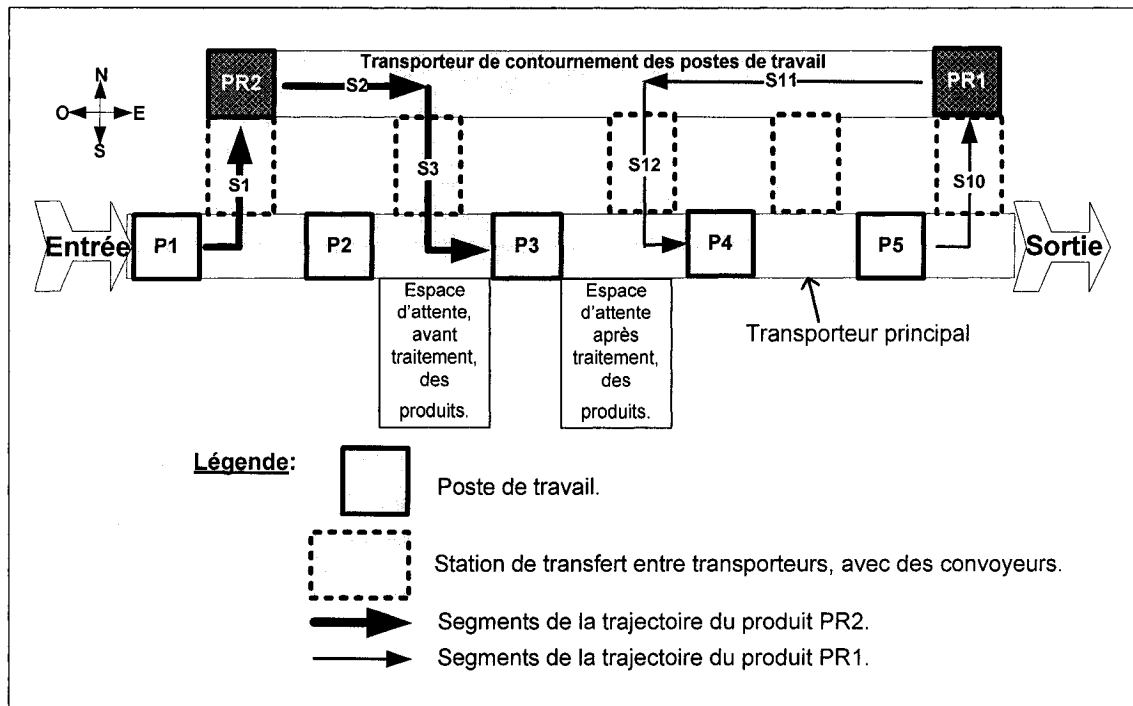


Figure 3. 7. Illustration d'une situation de blocage causé par les postes P1 et P5

Pour obtenir un *ST* robuste, les problèmes de blocage doivent être surmontés. Ceci est possible en prévoyant des solutions à l'avance, pour être introduites aux programmes de commande.

Ces situations de blocage sont largement traitées dans la littérature des *ST* (voir la sous-section 2.3.1). Cependant, la quasi-totalité des méthodes proposées pour contourner ces problèmes sont complexes et nécessitent beaucoup de ressources matérielles et financières pour être réalisées correctement. D'un autre côté, les travaux qui se penchent sur les *ST* à base de transporteurs et convoyeurs sont limités. Pour cette catégorie de *ST*, *S. Bussmann et K. Schild. (2001)* proposent, en cas de situation de blocage, une logique qui se limite à accorder la priorité à un sens considéré comme direction principale d'écoulement du système. *P. Valckenaers et H.V. Brussel (2003)* proposent une méthode dynamique destinée plus à des applications de grandes tailles. Cette méthode, destinée à une catégorie bien spécifique des *ST*, permet la détection et le contournement des

problèmes de blocage en se basant sur le contrôle informatique d'un réseau de nœuds et d'arcs qui représentent l'ensemble des éléments du système.

La méthode proposée dans ce mémoire est simple et facile à réaliser et à adapter pour des *ST* de petite et moyenne taille avec des complexités raisonnables. Cette méthode permet de donner des solutions raisonnablement efficaces pour éviter les problèmes de blocage. Cette problématique est abordée en introduisant des programmes de contournement de blocage. Ces programmes sont basés sur la gestion des files d'attentes, et les temps d'opérations des postes de travail qui sont à l'origine de tels problèmes.

3.4.3 - Méthode pour diagnostiquer les situations de blocage

Dans la procédure de conception des programmes pour une gamme de production avec retours en arrière, il faut procéder à la détection d'éventuelles situations de blocage. Le choix des trajectoires appropriées se fait en tenant compte des résultats de ce diagnostic. Pour ce faire, nous proposons de suivre les étapes suivantes :

- 1) tracer toutes les trajectoires possibles et raisonnables de la gamme de production;
- 2) localiser les sources potentielles de chevauchements dans chacune des trajectoires: les entités qui seront sollicitées à faire des déplacements dans deux sens (nord & sud ou est & ouest) ;
- 3) si de tels cas sont présents => possibilité de situation de blocage, sinon il n'y en a pas;
- 4) choisir la trajectoire qui ne présente pas de problème de blocage et qui utilise le minimum de ressources, ce qui réduit les chances d'avoir des arrêts du système (plus on utilise de ressources, plus les sources de problèmes augmentent, augmentant ainsi les chances d'avoir des arrêts du *ST*);
- 5) si toutes les trajectoires présentent des problèmes de blocage, choisir celle qui minimise le nombre de produits en cours et qui utilise le minimum de ressources du *ST*.

Ces étapes sont résumées dans l'organigramme présenté à la figure 3.8.

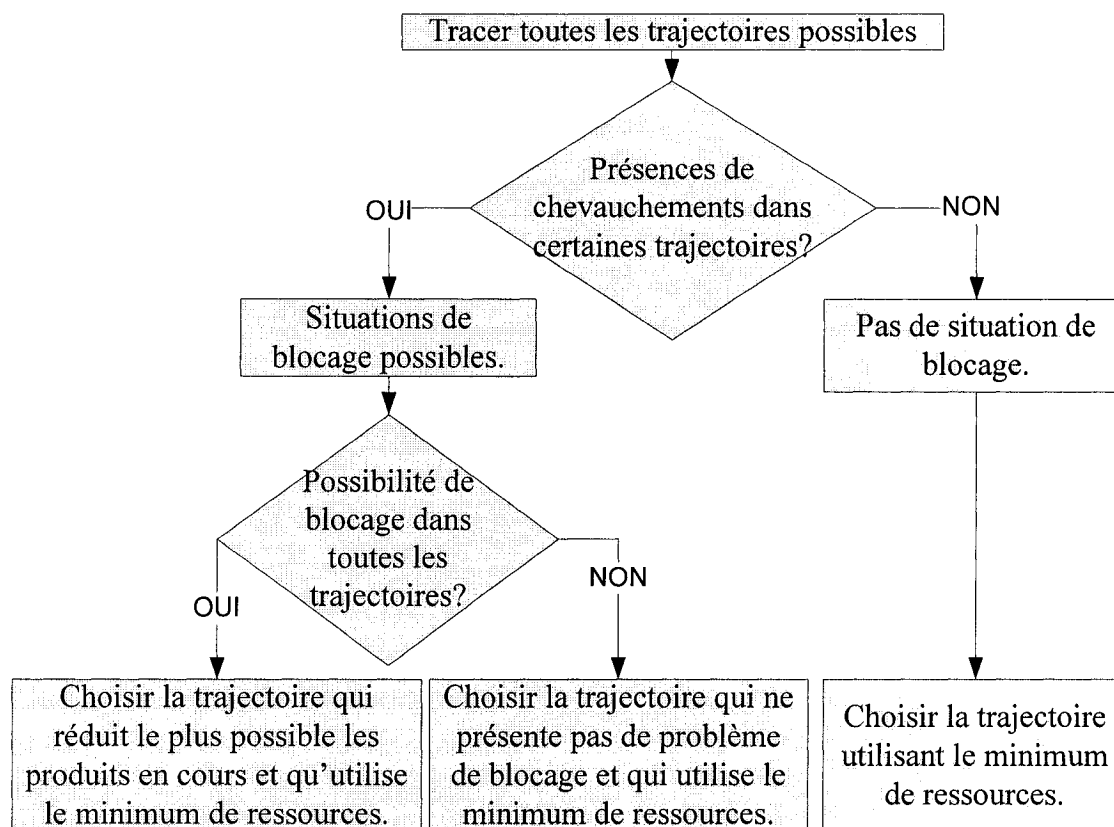


Figure 3. 8. Diagnostic de blocage et choix de trajectoires

Dans le cas où cette méthode débouche sur plus d'une trajectoire potentiellement intéressantes, deux versions doivent être retenues. L'une sera utilisée comme programme initial et l'autre comme version alternative. Les deux trajectoires retenues doivent nécessairement avoir le plus possible des ressources différentes. Cela permet au système de pouvoir fonctionner malgré que certaines ressources, utilisées uniquement par une seule trajectoire, ne soient pas fonctionnelles.

3.4.4 - Méthode pour éliminer les situations de blocage

Si un cas de blocage se présente, il faut concevoir un programme de commande qui est capable de surmonter ce genre de situation. La présente sous-section propose une méthode permettant de gérer les priorités d'exécution entre les programmes de transfert

à la source du problème de blocage. Dans les étapes de cette méthode, l'emphasis est mise sur les postes de travail, car c'est à partir d'eux que les produits vont être libérés. Ainsi, un poste de travail priorisé signifie que c'est lui qui va libérer son produit en premier. En d'autres mots, le programme de transfert qui va être exécuté est celui qui manutentionne le produit à partir de ce poste vers sa prochaine destination. Une méthode de gestion de priorités de libération de postes est proposée ci-dessous :

- 1) comparer les files d'attentes des postes de destination des produits;
- 2) donner la priorité au poste de travail dont le poste de destination représente la file d'attente la plus courte. Si plus d'un poste de destination a la plus courte file d'attente, exécuter les étapes suivantes :
- 3) comparer les files d'attentes des postes de travail qui sont à l'origine du problème de blocage et dont les postes de destination ont la plus courte file d'attente;
- 4) donner la priorité au poste de travail dont la file d'attente est la plus longue, à condition que le poste de destination soit disponible (file d'attente inférieure à la limite maximale), en autorisant au produit qui s'y trouve de le quitter. Dans le cas où le poste de destination, du poste de travail priorisé, n'est pas disponible : comparer les files d'attente des autres postes de travail et donner la priorité à celui qui représente la plus longue file d'attente. Si plus d'un poste a la plus longue file d'attente, exécuter les étapes suivantes :
- 5) si les deux files d'attentes des étapes 3 et 4 sont égales, donner la priorité au poste dont le temps d'opération est le plus long;
- 6) sinon, donner la priorité aléatoirement à un des postes.

N.B. Il est important de mentionner qu'il faut toujours prioriser le poste de travail dont la destination est la sortie du système. Cela permet de désengorger le système en évitant des situations de blocage qui peuvent arriver dans le cas où toutes les files d'attentes des autres postes de travail sont saturées.

Les étapes de cette méthode sont résumées dans l'organigramme présenté à la figure 3.9.

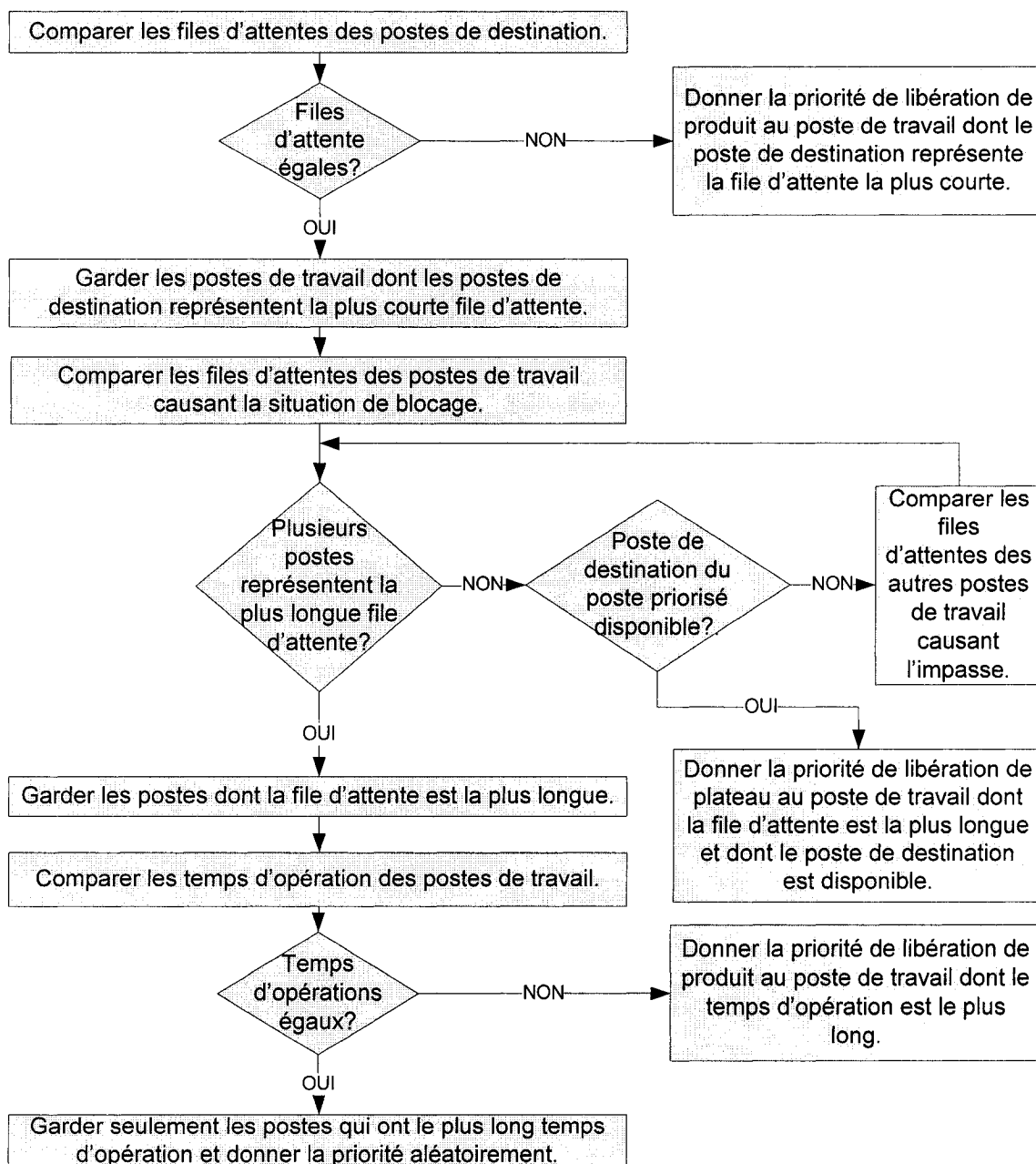


Figure 3. 9. Organigramme de la méthode de gestion de priorités de libération des postes de travail

Dans la méthode de gestion de priorités de libération des postes de travail présentée ci-dessus, l'ordre des tests présenté est le suivant :

- comparer les files d'attentes des postes de destination, des postes de travail à l'origine du problème de blocage;

- comparer les files d'attente des postes de travail à l'origine du problème de blocage;
- comparer les temps d'opérations des postes de travail à l'origine du problème de blocage.

Le choix de l'ordre d'exécution de ces tests est fait de sorte à augmenter le nombre des produits finis, en augmentant le nombre des produits quittant le *ST* le plus rapidement possible. Cela est réalisable en donnant toujours la priorité aux postes avancés de la gamme de production (voir l'exemple de l'annexe A).

3.4.5 - Utilisation multiple d'un poste de travail dans la même gamme de production

Les gammes de production utilisées, comme exemples, jusqu'à maintenant représentent la caractéristique d'utilisation unique des postes de travail. En fait, si on se retrouve avec une gamme de production faisant recours plus qu'une fois au même poste de travail, cela va présenter un problème majeur dans l'orientation des produits selon la bonne trajectoire. Pour mettre en évidence cette problématique, prenons l'exemple de la gamme suivante : P1- P4 – P3 – P4 – P5. Dans cette gamme, l'orientation des produits à partir du poste P4 représente un problème, car celui-ci est utilisé deux fois dans la gamme de production. En fait, un produit dont le traitement est terminé au poste P4 va causer, au système de commande, une confusion pour sa direction au poste suivant. Par conséquent, ce système ne peut savoir s'il doit diriger le produit vers le poste P3 ou vers P5. La complexité de gestion de ce genre de problèmes augmente avec le nombre de réutilisation des postes de travail.

Dans le cas de gammes de faible et moyenne complexité (*Une gamme est dite peu complexe lorsque la trajectoire de celle-ci ne compte pas beaucoup de retours en arrières et d'utilisation multiples de postes de travail*), il est raisonnablement possible de concevoir des programmes de commande dit **programmes de gestion d'orientation des produits**. Ces programmes permettent de gérer les destinations des produits, aux niveaux des postes utilisés à plusieurs reprises. Ces programmes font recours à l'utilisation de mémoires internes de l'automate programmable industriel (*API*). Ainsi, à chaque fois

qu'un produit arrive au poste réutilisé, le programme procède à vérifier sa provenance et active un bit dédié en fonction de la longueur de la file d'attente. Pour bien clarifier cette idée, la gamme P1- P4 – P3 – P4 – P5 sert d'exemple. Dans cette gamme, le poste de travail P4 est utilisé deux fois, ce qui signifie que le programme doit permettre aux produits quittant ce poste de prendre la bonne direction. Pour ce faire, 8 bits internes de l'API sont utilisés (M1_P1, M2_P1, M3_P1, M4_P1, M1_P3, M2_P3, M3_P3 et M4_P3). Ces bits sont répartis en deux groupes et appelés *bits d'orientation*:

- M1_P1, M2_P1, M3_P1, M4_P1: chacun de ces bits va être mis à 1 si le produit qui arrive au poste P4 est en provenance de P1 (exemple : M2_P1=1 si le 2^e produit de la file d'attente de P4 provient de P1);
- M1_P3, M2_P3, M3_P3 et M4_P3: chacun de ces bits va être mis à 1 si le produit qui arrive au poste P4 est en provenance de P3 (exemple : M3_P3=1 si le 3^e produit de la file d'attente de P4 provient de P3);

Ainsi, dans le cas où la file d'attente du poste P4 est égale à 4 produits, avec le 1^{er} et le 3^e produit proviennent de P1, et le 2^e et le 4^e proviennent de P3. Dans cette situation les valeurs prises par les bits internes seront les suivantes :

M1_P1	M2_P1	M3_P1	M4_P1
1	0	1	0

M1_P3	M2_P3	M3_P3	M4_P3
0	1	0	1

Lorsque le poste de travail P4 veut exécuter la libération d'un produit, le programme doit vérifier les bits correspondants au premier produit de sa file d'attente (**M1_P1** et **M1_P3**), pour savoir sa provenance et par conséquent sa destination. Dans l'exemple ci-dessus, c'est M1_P1 qui est égale à 1. Cela signifie que ce produit provient du poste P1 et doit, par conséquence, être acheminé vers P3 : **P1- P4 – P3 – P4 – P5**.

Après la libération du premier produit, le programme procède à la mise à jour de ses bits d'orientation : tous les produits de la file d'attente avancent, et leurs classements décroissent dans celle-ci de 1 niveau. Ainsi, le deuxième prend la 1^{ère} place, le 3^e prend la 2^e place ...etc. Le programme doit, alors, faire un décalage à gauche de chaque ensemble

de bits pour que ceux-ci suivent le déplacement physique des produits. Pour l'exemple étudié, cela signifie que les bits d'orientation vont prendre les valeurs suivantes :

M1_P1	M2_P1	M3_P1	M4_P1
0	1	0	0

M1_P3	M2_P3	M3_P3	M4_P3
1	0	1	0

Par conséquent, à la prochaine libération, le produit qui quitte le poste P4 va être acheminé vers le poste P5, car il est en provenance du poste P3 ($M1_P3 = 1$) : **P1 - P4 - P3 - P4 - P5**.

Ainsi, le programme continue à procéder de la même façon, pour faire l'orientation des produits quittant le poste P4. Cette méthode d'orientation des produits est présentée d'une façon générale à la figure 3.10 :

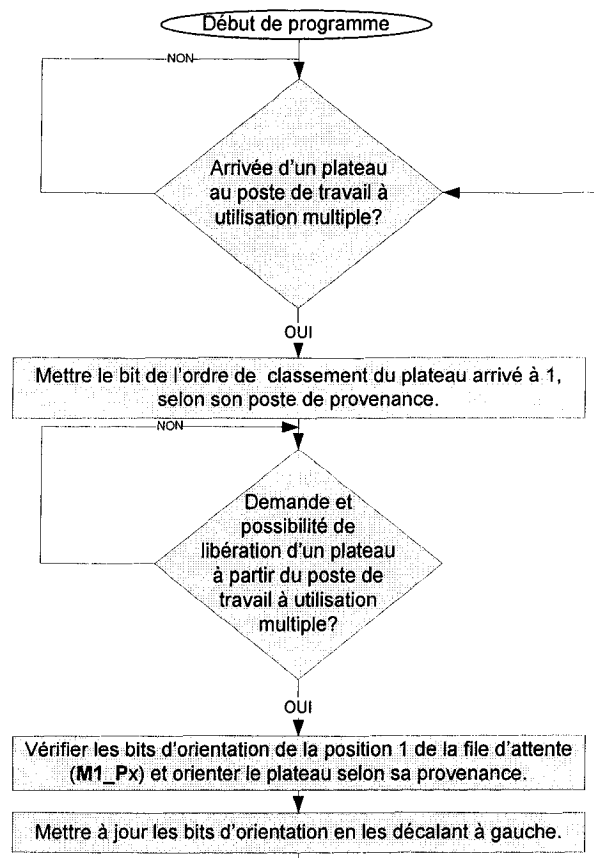


Figure 3. 10. Organigramme de la méthode d'orientation des produits pour un poste à destinations multiples

Remarque

Pour des raisons de simplification des programmes de commande, il est possible, dans certains cas, de procéder à la segmentation des gammes de production pour éviter ou simplifier les cas des utilisations multiples. Ainsi, pour réaliser la gamme P1 - P4 - P3 - P4 - P5, les concepteurs peuvent procéder ainsi : décomposer la gamme de production en plusieurs sous-gammes, dont chacune ne fait appel qu'une seule fois, ou peu de fois, à chacun des postes de travail :

- faire le premier lot des produits avec la sous-gamme1 : P1 - P4 - P3 - sortie du système;
- après la fin du traitement des produits avec la sous-gamme1, réintroduire les produits dans le système;
- exécuter la sous-gamme2 : P4 - P5 - sortie du système.

Bien que cette façon de faire simplifie les programmes de commande, elle occasionne des retards au niveau de la production. Ces retards sont causés par les temps de téléchargement des programmes de commande des sous-gammes et par les opérations sans valeur ajoutée. Ces dernières sont représentées par les opérations de récupération à la sortie du *ST* des produits qui ont subi une partie de traitement, et de leur réintroduction à celui-ci, pour subir les opérations subséquentes.

Cas exceptionnels

Dans ce paragraphe, nous présentons une façon de traiter les cas où des séquences de postes de travail sont utilisées à répétition dans la même gamme de production. Dans de telles situations, il faut créer des sous-programmes qui permettent l'exécution des séquences en question. Ces sous-programmes vont être gérés de la même manière présentée au début de la présente section. L'exemple suivant illustre ce genre de situation.

Soit la gamme de production : P1 - **P2** - **P3** - P4 - **P2** - **P3** - P5. Dans cette gamme, la séquence P2 – P3 est utilisée deux fois. Pour orienter les produits quittant P3, il n'est pas

possible de se baser sur leurs provenances, car dans les deux cas, les produits proviennent du poste P2. Par conséquent, il faut remplacer la séquence P2 – P3 par un sous programme (*SP23*). La gamme peut s'écrire, alors sous la forme suivante :

P1 - ***SP23*** - P4 - ***SP23*** - P5. De cette façon, il est possible de gérer facilement la destination des produits quittant la séquence *SP23* en se basant sur leurs provenances : soit P1 ou P4.

3.5 - Conclusion

Ce chapitre présente des méthodes destinées à améliorer la flexibilité et la robustesse des *ST*. L'amélioration de la flexibilité est basée principalement sur la stratégie de répartition physique et logique, tout en se concentrant sur la notion de réutilisation des programmes de commande. En ce qui concerne l'amélioration de la robustesse, ce chapitre présente des méthodes pour localiser et éviter les problèmes de blocage et pour gérer l'orientation des produits dans les cas d'utilisations multiples des postes de travail dans la même gamme de production.

Bien que l'on réussisse à surmonter les situations de blocage, celles-ci restent toujours une source considérable de retards en production. Cela est justifié par ceci : lorsque plusieurs opérations de transfert dont les trajectoires entrent en conflit entre elles demandent à être exécutées, le programme procède à l'exécution d'une seule trajectoire à la fois et les autres attendent. Par conséquent, les retards occasionnés sont proportionnels au nombre de trajectoires qui entrent en conflit simultanément. Pour cette raison, la méthode de sélection de la trajectoire appropriée pour une gamme de production occupe une grande importance, car c'est à cette étape que le concepteur de programme doit choisir les trajectoires qui présentent le minimum de conflits.

Pour prévoir le comportement d'un *S.T* pour des gammes complexes, il est pertinent de simuler son comportement sur des longues durées, soit la durée d'un quart de travail. Cela permet de faire une évaluation globale de son efficacité et sa résistance aux situations de blocage imprévisible. En pratique, les situations de blocage ne se

présentent pas nécessairement d'une façon cyclique, car les temps d'opération, et surtout de déplacement des produits, peuvent subir des légers changements, notamment si les postes de travail sont commandés par des opérateurs (cas de l'atelier test de ce projet) et non par des systèmes automatisés qui permettent d'avoir des temps d'opération fixes. Ces perturbations doivent être prises en considération lors de la simulation.

Dans ce chapitre, nous avons présenté des méthodes efficaces pour contourner les problèmes d'utilisations multiples d'un poste de travail ou d'une séquence dans la même gamme de production. Ces méthodes sont dédiées principalement au gamme de production à faible et moyen taux de complexité. Dans le cas des gammes complexes, il est plus pratique d'avoir recours à d'autres catégories de programmes, appelés *programmes automatiques avec système de reconnaissance*. Ces derniers représentent la propriété d'avoir des étiquettes électroniques jumelées à chacun des produits, pour pouvoir savoir à tout moment les postes de travail par lesquelles un produit est déjà passé et ceux qui lui reste à visiter dans le cadre de sa gamme de production. Ces mémoires offrent aussi la possibilité au système de commande de connaître le poste suivant qu'un produit doit atteindre, dans le cadre de sa gamme de production, à chaque fois que celui-ci a besoin d'être déplacé.

La deuxième application de ces programmes automatiques consiste à les utiliser dans le cas de production multiproduit. Dans ce type de production, plusieurs gammes sont en exécution simultanée, ce qui rend la tâche d'orientation des produits très complexe. L'utilisation d'un système de reconnaissance automatique est alors indispensable pour gérer efficacement les trajectoires de chacune des gammes de production.

CHAPITRE 4 – ATELIER TEST (laboratoire de transitique et de robotique de l'École Polytechnique de Montréal)

4.1 - Introduction

Après la présentation dans le chapitre précédent des concepts et méthodes proposés pour l'amélioration de la flexibilité et de la robustesse des *ST*, le présent chapitre s'attarde sur la présentation du *ST* sur le quel ces concepts vont être testés. Les essais pratiques du présent projet sont réalisés sur le *ST* du *laboratoire de transitique et de robotique* de l'École polytechnique de Montréal. Ce système de type boucle fermée, avec une entrée et une sortie est muni de cinq postes de travail et de plusieurs stations de transfert équipées de convoyeurs à courroies et permettant, entre autres, le contournement des postes de travail. Chacun de ces postes compte un espace d'attente des produits, situé à son amont, sur le transporteur principal. La manutention des produits est effectuée grâce à des transporteurs à chaîne charnière à palettes.

Ce chapitre présente une description détaillée de ce *ST*. La deuxième section présente le contexte et les objectifs de ce système. En troisième lieu, la section 4.3 présente les composants de la chaîne transitique ainsi que la partie commande et supervision du *ST*. La décomposition hiérarchique du *ST* de l'*atelier test* est résumée dans la section 4.4. Les contraintes physiques et technologiques, quant à elles, sont présentées à la quatrième section, qui précède la conclusion de ce chapitre.

4.2 - Contexte et objectifs du *ST*

Avant de présenter les objectifs du *ST*, il s'avère pertinent de présenter son contexte de travail.

4.2.1 - Contexte du *ST*

Le milieu de fonctionnement du *ST* est présenté dans un contexte de production, composé de deux principaux éléments :

- un système de production qui peut être dans le cadre d'une entreprise qui fait sa propre production ou qui offre des services de sous-traitance;
- un *ST* qui permet d'orchestrer les opérations de manutention entre les différents postes de travail d'une ou plusieurs chaînes de production de l'entreprise.

N.B. Dans ce *ST* les produits sont désignés par « plateau ».

4.2.2 - Objectifs du *ST*

Le *ST* doit être capable de gérer d'une manière efficace et efficiente les trajectoires suivies par les produits pour chacune des gammes de production. Cela doit se faire de façon à minimiser les déplacements des produits et à éviter les goulots d'étranglement et la quantité des *encours* sur la chaîne. Les objectifs du *ST* sont les suivants :

- le système doit être capable d'orienter, de façon relativement optimale, les produits sur la chaîne transitive en se basant sur leurs gammes de production;
- le système doit offrir aux produits la possibilité de contourner un ou plusieurs postes de travail qui ne figurent pas dans leur gamme de production;
- l'admission et l'évacuation des produits doivent se faire d'une façon automatique;
- le système doit offrir des modes de fonctionnement adaptés aux types de production, soit la production par lots (avec la présence simultanée de plusieurs produits de même type dans le *ST*) et la production multiproduit (avec la présence simultanée de plusieurs types de produits, dans le *ST*);
- le système doit offrir un mode de fonctionnement dégradé, utilisé dans le cas de dysfonctionnement de certaines de ses ressources;
- le système doit être équipé d'un mécanisme de pilotage et de commande par ordinateur, pour exécuter les différentes trajectoires des gammes de production,

afficher l'état de la chaîne transitive en temps réel, et démarrer ou arrêter les programmes de commande.

4.3 - Aspect général du *ST*

Le *ST* est composé de trois parties principales soit la chaîne transitive, le système de commande et celui de supervision. Dans le cadre de ce projet, les changements ne sont permis que dans la partie commande et supervision. En fait, la réingénierie de ce *ST* consiste à remplacer son système de commande par un nouveau. Les composants de ces deux systèmes sont présentés dans les annexes B.

4.3.1 - Chaîne transitive

La chaîne transitive représente la partie opérative du *ST* et est équipée d'une grande variété d'équipements qui lui permettent d'accomplir ses fonctions. La figure 4.1 présente les principaux éléments de ce système, soit les transporteurs, les postes de travail et les stations de transfert ainsi que les sens de direction des transporteurs et des convoyeurs.

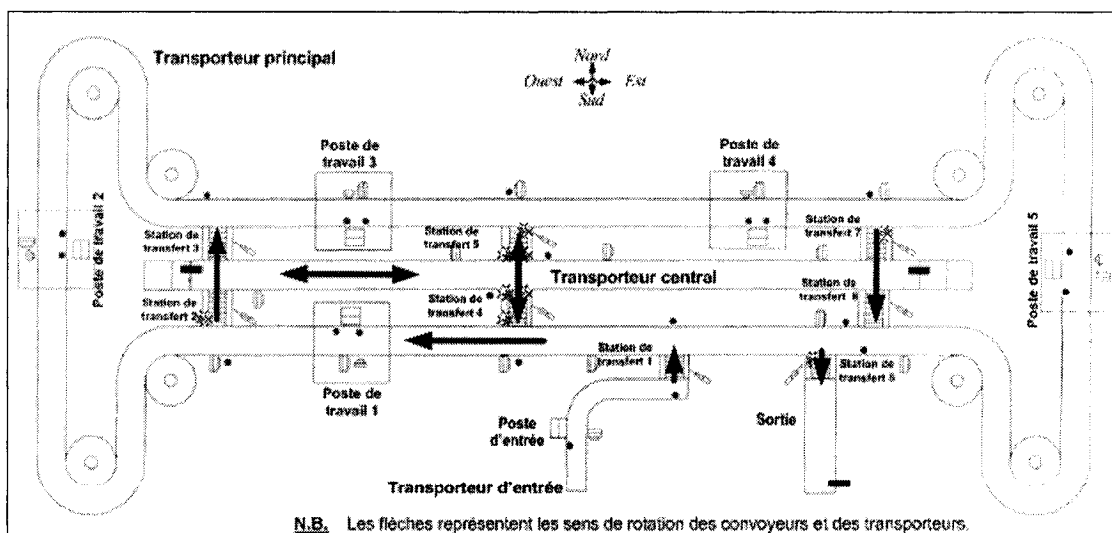


Figure 4. 1. Éléments de la chaîne transitive

Les cinq paragraphes suivants présentent une description pour chacun des éléments faisant partie de la chaîne transitive. Ces éléments sont successivement : les plateaux,

les transporteurs, les postes de travail, les stations de transfert, les capteurs et actionneurs.

Plateaux

La chaîne transitive est dotée de 20 plateaux (longueur = 25,2 cm, largeur = 15, hauteur = 10,6 cm) qui servent de supports de manutention pour les produits. Ils sont conçus de deux matériaux : métal et plastique. Les plateaux sont adaptés aux transporteurs et aux stations de transfert et dotés de mémoires SRAM (Statique RAM) qui permettent la lecture et l'écriture des informations concernant le contenu des plateaux. Ces mémoires sont lisibles à l'arrêt du plateau et non à la volée.

Transporteurs

La chaîne transitive est dotée de quatre catégories de transporteurs.

- 1) Transporteur principal : C'est un transporteur à chaîne charnière à palettes qui sert à déplacer les plateaux aux différents postes de travail en suivant la trajectoire du contour de la chaîne transitive.
- 2) Transporteur central : C'est un transporteur à chaîne charnière à palettes qui sert à déplacer les plateaux sur la voie centrale, dans l'objectif d'éviter (contourner) les postes qui ne rentrent pas dans la gamme de production ou d'assemblage d'un produit. Ces opérations s'effectuent à l'aide des stations de transfert dans l'objectif de minimiser les distances parcourues par les produits et de réduire leurs temps d'attente.
- 3) Transporteur d'entrée : C'est un transporteur à chaîne charnière à palettes qui sert à déplacer les plateaux de l'entrée de la chaîne vers la première station de transfert. Cette dernière se charge de transférer le plateau au transporteur principal.
- 4) Transporteur de sortie : La sortie du système est un transporteur de type toboggan servant à déplacer les plateaux, dont toutes les opérations de traitement sont terminées.

Postes de travail

La chaîne transitive dessert cinq postes de travail. Ces postes peuvent être présentés sous forme de deux catégories :

- postes de transformation comme des opérations d'usinage, de soudage;
- postes de services comme des opérations de métrologie, de contrôle de qualité.

Au vue de système, les postes de travail ont tous les mêmes caractéristiques. Le *ST* permet d'arrêter ou d'immobiliser un plateau à un poste. L'arrêt d'un plateau se fait pour le préparer à être immobilisé ou pour une simple vérification d'identité, dans le cas de fonctionnement en mode automatique avec système de reconnaissance, tandis que l'immobilisation s'exécute dans le cas où celui-ci doit être traité dans le poste en question.

Stations de transfert

Les stations de transfert assurent le passage des plateaux d'un transporteur à un autre. Elles sont matérialisées par des convoyeurs à courroies munis des vérins de soulèvement. La chaîne transitive compte huit stations de transfert (ST1 à ST8) qui offrent les services suivants :

- transférer les plateaux du transporteur d'entrée vers le transporteur principal;
- transférer les plateaux du transporteur principal vers celui de la sortie;
- transférer les plateaux du transporteur principal vers le transporteur central et vis-versa.

Le transfert d'un plateau d'un transporteur à l'autre se fait de la façon suivante. Dès que le plateau nécessitant un transfert est détecté et son transfert est autorisé par le programme de commande, celui-ci est arrêté devant le convoyeur qui commence à tourner avant d'être légèrement soulevé pour pouvoir accrocher le plateau en question. Lorsque le plateau arrive à l'extrémité du convoyeur, ce dernier se rabaisse pour que le plateau puisse rejoindre le transporteur de destination. Le convoyeur arrête de tourner lorsque le plateau rejoint le transporteur. Les sens de rotation des convoyeurs sont illustrés à la figure 4.1.

Les convoyeurs des stations de transfert (ST2 - ST3) (ST4 - ST5) (ST6 - ST7) (ST1 - ST8) respectivement, tournent simultanément malgré que chaque convoyeur soit équipé de son propre moteur.

Capteurs et actionneurs

La chaîne transistive est équipée de 49 capteurs et 45 actionneurs qui permettent de détecter la présence des plateaux dans divers emplacements (capteurs) et d'exécuter les actions ordonnées par le système de pilotage. Ces éléments vont être présentés en détail dans les paragraphes subséquents.

Les figures 4.2 et 4.3, illustrent les références et les localisations des capteurs et actionneurs utilisés par le *ST*.

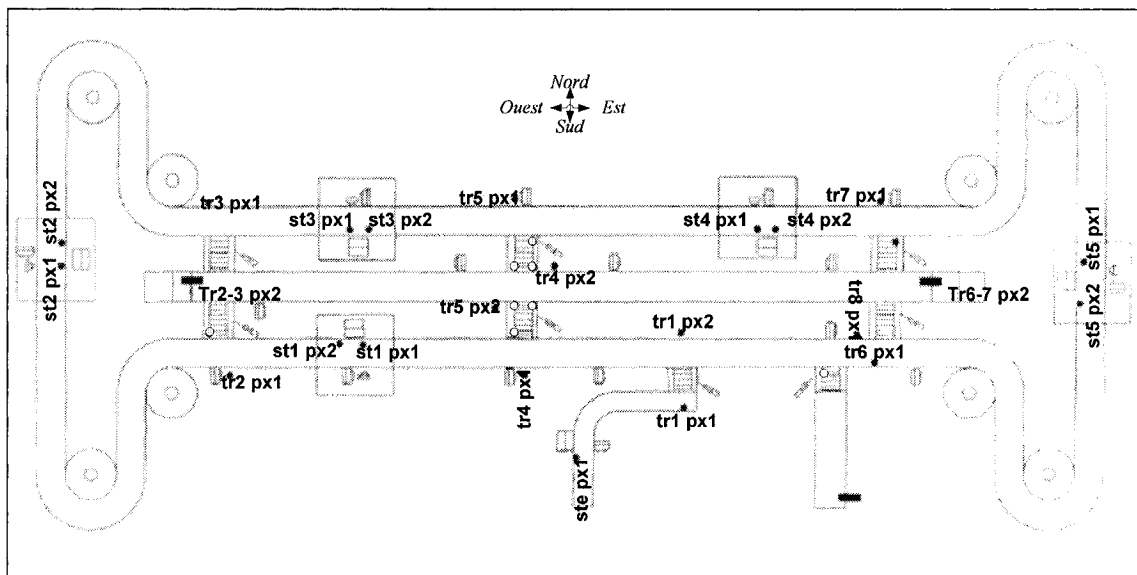


Figure 4. 2. Capteurs utilisés par le ST

Légende : voir les tableaux 4.1 et 4.4

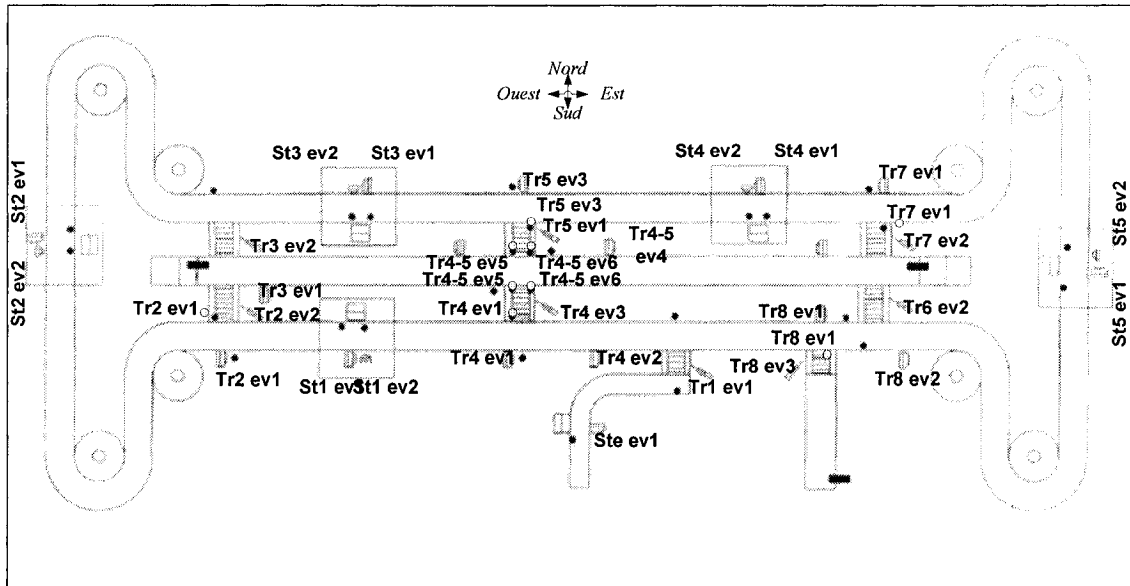


Figure 4. 3. Actionneurs utilisés par le ST

Légende : voir les tableaux 4.2 et 4.5

Les deux paragraphes a) et b) présentent les capteurs et les actionneurs utilisés dans les postes de travail et les stations de transfert. Les capteurs sont tous des capteurs inductifs, tandis que les actionneurs sont des vérins pneumatiques à simple effet qui sont pilotés par des pré-actionneurs sous forme de distributeurs 2 positions / 4 voies à commande électrique.

a) Postes de travail

Chacun des postes de travail compte deux capteurs et deux actionneurs (voir la figure 4.4). Les capteurs servent à détecter la présence d'un plateau au poste en question. L'un des deux actionneurs sert à arrêter le plateau, tandis que l'autre permet de l'immobiliser dans le cas où celui-ci doit être traité dans ce poste.

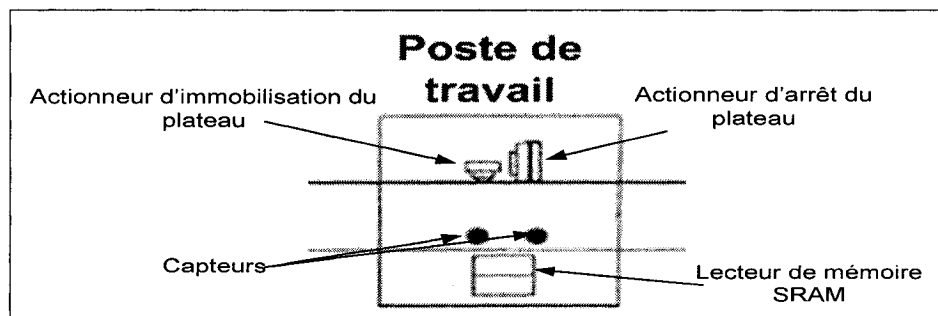


Figure 4. 4. Composants d'un poste de travail (vue de dessus)

Les tableaux 4.1 et 4.2 présentent les composants des postes de travail, leurs références sur le système, ainsi que leurs fonctions.

Tableau 4. 1. Capteurs utilisés dans les postes de travail

Référence	Fonction
Ste px1	Détecter la présence d'un plateau au poste d'entrée.
St1 px1	Détecter la présence d'un plateau à l'entrée du poste de travail # 1.
St1 px2	Détecter la présence d'un plateau au poste de travail # 1.
St2 px1	Détecter la présence d'un plateau à l'entrée du poste de travail # 2.
St2 px2	Détecter la présence d'un plateau au poste de travail # 2.
St3 px1	Détecter la présence d'un plateau à l'entrée du poste de travail # 3.
St3 px2	Détecter la présence d'un plateau au poste de travail # 3.
St4 px1	Détecter la présence d'un plateau à l'entrée du poste de travail # 4.
St4 px2	Détecter la présence d'un plateau au poste de travail # 4.
St5 px1	Détecter la présence d'un plateau à l'entrée du poste de travail # 5.
St5 px2	Détecter la présence d'un plateau au poste de travail # 5.

Remarque :

Les capteurs inductifs détectent uniquement la présence du métal. Les plateaux sont tous munis des pièces métalliques dans la partie inférieure en contact avec la chaîne transitive. Ces pièces sont placées de sorte à ne détecter les plateaux que s'ils sont à la bonne position, là où ils doivent être arrêtés.

Tableau 4. 2. Actionneurs utilisés à la conception des postes de travail

Référence	Fonction
Ste ev1	Arrêter le plateau au poste d'entrée.
St1 ev1	Arrêter le plateau au poste de travail 1.
St1 ev2	Immobiliser le plateau au poste de travail 1 pour qu'il y soit traité.
St2 ev1	Arrêter le plateau au poste de travail 2.
St2 ev2	Immobiliser le plateau au poste de travail 2 pour qu'il y soit traité.
St3 ev1	Arrêter le plateau au poste de travail 3.
St3 ev2	Immobiliser le plateau au poste de travail 3 pour qu'il y soit traité.
St4 ev1	Arrêter le plateau au poste de travail 4.
St4 ev2	Immobiliser le plateau au poste de travail 4 pour qu'il y soit traité.
St5 ev1	Arrêter le plateau au poste de travail 5.
St5 ev2	Immobiliser le plateau au poste de travail 5 pour qu'il y soit traité.

Chacun des postes de travail est équipé d'une boîte de commande contenant deux boutons poussoir, un commutateur à trois positions et un témoin lumineux. Le tableau 4.3 présente le rôle de chacun de ces éléments.

Tableau 4. 3. Éléments des boîtes de commande des postes de travail

Élément	Fonction
B.P. <i>Demande</i> ou <i>libère</i>	- Demander l'immobilisation d'un plateau pour qu'il soit traité. - Libérer le plateau après la fin du traitement.
Position <i>Auto</i> du commutateur	Choisir le mode automatique ou semi-automatique.
Position <i>Arrêt</i> du commutateur	Choisir le mode Arrêt.
Position <i>Man</i> du commutateur	Choisir le mode manuel.
B.P. <i>Arrêt</i>	Arrêter le fonctionnement du système.

b) Stations de transfert

Ces stations sont équipées de plusieurs capteurs et actionneurs qui leur permettent d'accomplir leurs fonctions. Les tableaux 4.4 et 4.5 énumèrent ces éléments, ainsi que leurs fonctions.

Tableau 4. 4. Capteurs utilisés aux stations de transfert

Référence	Câble de connexion	Fonction
Tr1 px1	901	Détecter la présence d'un plateau en amont de la station de transfert 1.
Tr1 px2	911	Détecter l'arrivée d'un plateau en aval de la station de transfert 1.
Tr2 px1	951	Détecter la présence d'un plateau devant la station de transfert 2.
Tr2-3 px2	961	Détecter la présence d'un plateau, sur le transporteur central, derrière les stations de transfert 2 et 3.
Tr3 px1	971	Détecter la présence d'un plateau devant la station de transfert 3.
Tr4 px1	1001	Détecter la présence d'un plateau devant la station de transfert 4.
Tr4 px2	1011	Détecter la présence d'un plateau sur la station de transfert 4.
Tr5 px1	1031	Détecter la présence d'un plateau devant la station de transfert 5.
Tr5 px2	1061	Détecter la présence d'un plateau sur la station de transfert 5.
Tr6 px1	1081	Détecter la présence d'un plateau devant la station de transfert 6.
Tr6-7 px2	1091	Détecter la présence d'un plateau, sur le transporteur central, derrière les postes de transfert 6 et 7.
Tr7 px1	1121	Détecter la présence d'un plateau devant la station de transfert 7.
Tr8 px1	1131	Détecter la présence d'un plateau devant la station de transfert 8.

4.3.2 - Système de commande

La commande du *ST* (figure 4.5) est assurée par un *API Télémécanique* (TSXP573623M), équipé des accessoires suivants :

- 4 cartes d'entrées logiques (TSXDEY16A4) qui reçoivent les informations des capteurs pour les transmettre à l'*API*;
- 4 cartes de sorties logiques (TSXDSY16S4) qui reçoivent les informations de l'*API*, sous forme d'un signal tout ou rien, pour les transmettre aux actionneurs;
- 1 carte de sortie analogique (TSXASY410) qui reçoit les informations de l'*API*, sous forme de tensions variables, à courant continu, destinées aux variateurs de vitesse des moteurs électriques qui entraînent les transporteurs;

- 2 cartes de communications (SCM2014) utilisées uniquement en mode automatique, pour assurer la communication entre les contrôleurs des lecteurs (OMRON V600-H11) de mémoires SRAM (OMRON V600 D8K R04) et l'*API*.

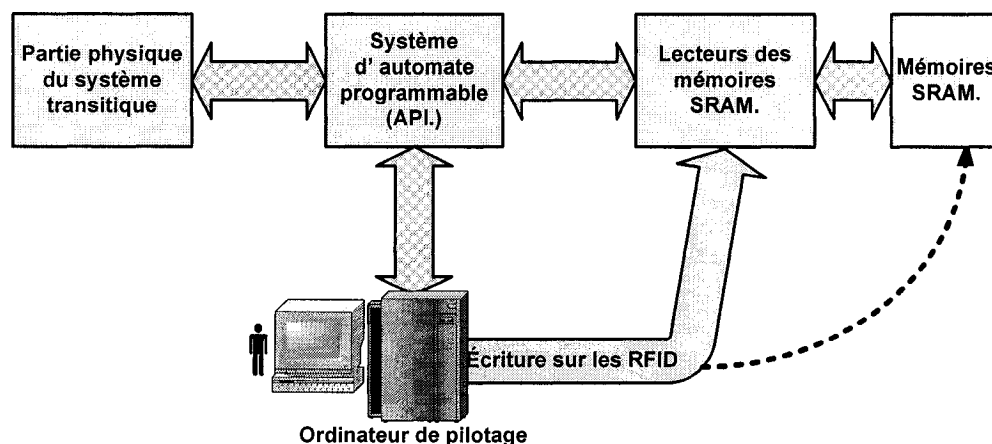


Figure 4. 5. Diagramme de communication entre les éléments du système

Bien que l'*API* Télémécanique offre la possibilité d'utiliser plusieurs langages de programmation, dans le cadre de ce projet on utilise principalement le langage des Graphes Fonctionnels de Commande des étapes et Transitions (GRAFCET) et le langage des réseaux contacts (LADDER).

La présente section présente la logique suivie pour concevoir et programmer les GRAFCET.

Conception des programmes de commande

Pour l'établissement d'un programme transférable à l'*API*, la création d'un GRAFCET niveau 1 permet de présenter le principe de fonctionnement du programme et de mettre en clair ses différentes étapes et transitions en utilisant des expressions textuelles. Le GRAFCET niveau 2, quant à lui, est basé sur celui du niveau 1 et le représente en n'utilisant que les références des capteurs et des actionneurs. La programmation sur le logiciel de l'*API* (PL7 pro v 4.5) est réalisée à partir de ce deuxième GRAFCET et est basée principalement sur des commandes sous forme d'équations logiques programmées

en LADDER. Ces équations utilisent les adresses d'entrées et sorties de l'*API* ainsi que différentes fonctions offertes par celui-ci (temporisateurs, compteurs...etc.).

Adressage des entrées / sorties dans l'*API*

L'opération d'adressage consiste à jumeler chacune des entrées et sorties à une adresse de l'*API*. Celles-ci sont utilisées pour toutes les applications subséquentes et sont illustrées dans l'annexe C avec la numérotation des câbles facilitant le branchement de l'*API*.

Structure des programmes introduits à l'*API*

La structure présentée à la figure 4.6 est utilisée pour tous les programmes du présent projet.

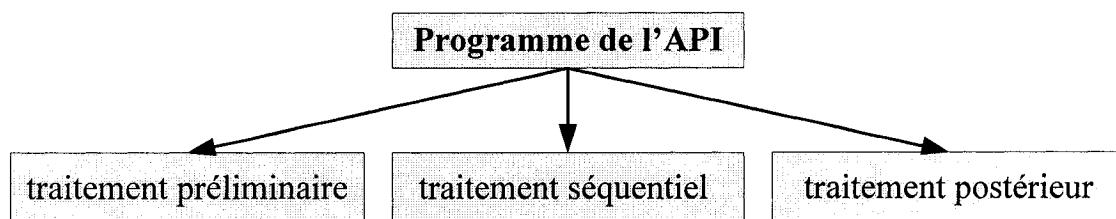


Figure 4. 6. Structure des programmes GRAFCET

Les programmes de l'*API* sont composés de trois principaux éléments :

- traitement préliminaire : contient les éléments d'arrêts d'urgence et d'initialisation des GRAFCET après un arrêt normal ou d'urgence d'un programme;
- traitement séquentiel : contient les étapes et les transitions du GRAFCET. Les étapes sont introduites directement par des diagrammes GRAFCET, tandis que les transitions sont programmées avec des réseaux contacts;
- traitement postérieur : permet de programmer toutes les actions liées aux étapes d'un GRAFCET ainsi que les temporisateurs et les compteurs reliés aux différents programmes.

4.3.3 - Système de supervision

Le *ST* est muni d'un système SCADA (*Supervisory Control And Data Acquisition*), permettant la supervision de la chaîne transitive via un ordinateur. La réalisation de ce système est basée sur l'option d'écrans d'exécution (*Runtime Screens*) offerte par le logiciel *PL7 Pro V4.5*. Pour assurer une supervision efficace, ce système permet d'afficher l'état de la chaîne transitive en *temps réel* en se basant sur les informations fournies par le programme de commande et les nombreux capteurs placés sur plusieurs localisations stratégiques de la chaîne transitive.

Le principe de fonctionnement du système de supervision est basé sur la commande de plusieurs entités (rectangles, cercles, triangles...etc.) regroupées ensembles, pour faire une présentation similaire à celle d'une vue de dessus du *ST* (figure 4.7). Une entité peut être commandée par un des éléments suivants :

- le signal provenant d'un capteur;
- le signal provenant de l'activation ou la désactivation d'un actionneur;
- le signal provenant de l'activation ou la désactivation d'une étape du GRAFCET;
- le signal provenant de l'activation ou la désactivation d'une action du GRAFCET;
- le signal provenant de l'activation ou la désactivation d'un bit interne de l'*API*.

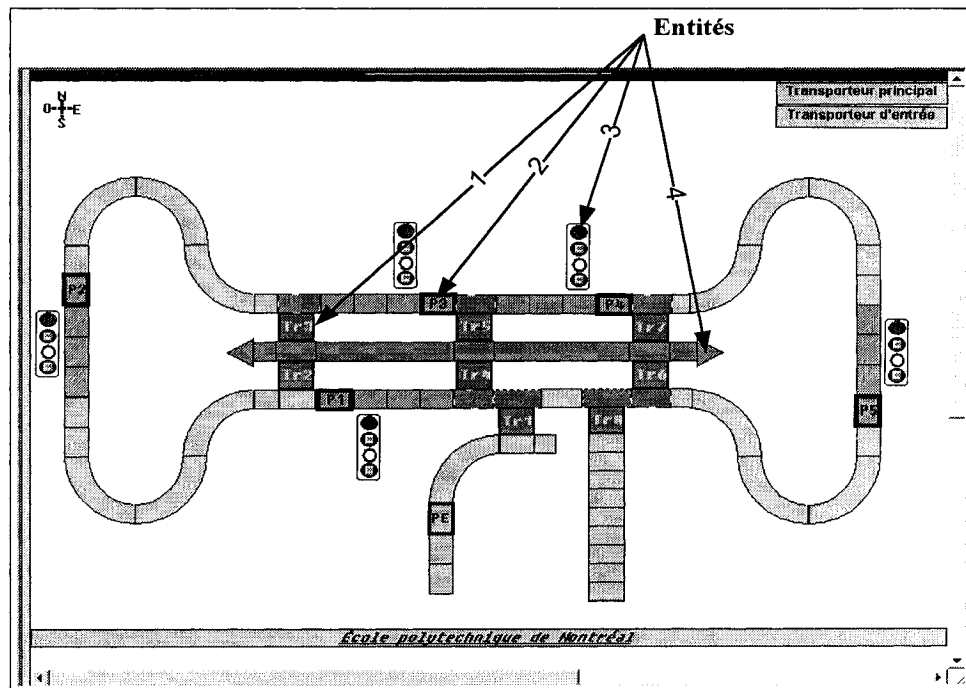


Figure 4. 7. Affichage du système de supervision et de contrôle

Sur la figure 4.7, quatre entités sont identifiées à titre d'exemple :

- entité 1 : un rectangle qui représente la station de transfert ST3 et qui est activée lorsque cette station est en marche. L'activation de cet élément se traduit par un changement de couleur dans l'écran SCADA;
- entité 2 : un rectangle symbolisant un plateau et dont la couleur change et devient clignotante dès que le capteur de présence d'un plateau au poste de travail 3 (St3px1) est actionné;
- entité 3 : un voyant circulaire dont la couleur change et devient clignotante dès que le bouton poussoir du poste de travail 3 (BP3) est actionné;
- entité 4 : une flèche dirigée vers l'est et dont la couleur change et devient clignotante dès que le transporteur central exécute un déplacement vers l'est.

4.4 – Décomposition hiérarchique du ST

La présente section met en évidence la décomposition hiérarchique des différents éléments du ST étudiés dans l'atelier test. Comme présenté dans la sous-section 3.3.1 du

chapitre 3, quatre niveaux hiérarchiques sont utilisés : les installations opérationnelles, les unités de travail, les éléments d'unités et les composants d'éléments.

4.4.1 - Installations opérationnelles

Dans ce niveau hiérarchique, le *ST* ne compte pas beaucoup d'éléments. Le tableau 4.5 présente les principales installations opérationnelles du système de *l'atelier test*.

Tableau 4. 5. Installations opérationnelles du *ST* de *l'atelier test*

Installation opérationnelle	Unités de travail correspondantes
Entrée du système	- Transporteur d'entrée; - Poste d'entrée; - Station de transfert d'entrée (ST1).
Sortie du système	- Transporteur de sortie; - Station de transfert de sortie (ST8).

4.4.2 - Unités de travail

Les unités de travail identifiées dans le *ST* de *l'atelier test* sont les suivantes :

- transporteur principal;
- transporteur d'entrée;
- transporteur central;
- poste d'entrée;
- postes de travail : P1, P2, P3, P4 et P5;
- stations de transfert : ST1, ST2, ST3, ST4, ST5, ST6, ST7 et ST8.

Dans la réalisation des programmes de commande, chacune de ces unités de travail a son propre sous-programme de commande.

4.4.3 - Éléments d'unité

Chaque unité de travail est décomposée en plusieurs éléments d'unité. Ces éléments sont généralement sous forme de capteurs ou d'actionneurs qui rentrent dans la réalisation

des programmes de commande des unités de travail. Le tableau 4.6 présente la décomposition de chaque catégorie d'unités de travail.

Tableau 4. 6. Éléments d'unité du *ST* de l'*atelier test*

Unité de travail	Éléments d'unités correspondants
- Transporteur principal - Transporteur d'entrée - Transporteur central	- Moteur électrique à courant continu - Variateur de vitesse (carte électronique) - Réducteur de vitesse (système d'engrenages) - Chaîne à charnière
Poste d'entrée	- Électrovanne de blocage de plateaux - Électrovanne d'immobilisation de plateaux - Deux distributeurs 2 positions / 4 voies à commande électrique - Capteur inductif - Lecteur de mémoire SRAM (utilisé uniquement en mode automatique)
Postes de travail	- Électrovanne de blocage de plateaux - Électrovanne d'immobilisation de plateaux - Deux distributeurs 2 positions / 4 voies à commande électrique - Deux capteurs inductifs - Boîtier de commande - Lecteur de mémoire SRAM (utilisé uniquement en mode automatique)
Station de transfert	- Convoyeur à courroie - Électrovanne élévatrice - Distributeur 2 positions / 4 voies à commande électrique - Capteurs situés à l'entrée et à la sortie de la station - Électrovannes : en amont et en aval de la station

4.4.4 - Composants d'éléments

Ce dernier niveau hiérarchique compte les éléments qui rentrent dans la constitution des éléments d'unité (niveau hiérarchique 3). Le tableau 4.7 en donne quelques exemples.

Tableau 4. 7. Composants d'éléments du *ST* de l'*atelier test*

Élément d'unité	Composants d'élément correspondants
Électrovanne de blocage de plateaux; Ou Électrovanne d'immobilisation de plateaux.	- Bobine de commande; - Vérin pneumatique; - Partie mécanique de blocage ou d'immobilisation liée au piston du vérin.
Boîtier de commande.	- Bouton poussoir de commande (marche); - Bouton poussoir d'arrêt; - Commutateur de sélection de mode de fonctionnement; - Voyant lumineux.
Convoyeur à courroie.	- Moteur électrique triphasé; - Courroie; - Structure mécanique.
Électrovanne élévatrice.	- Bobine de commande; - Vérin pneumatique; - Plateforme liée avec le piston du vérin.

4.5 - Contraintes de fonctionnement du *ST*

Les contraintes relatives au fonctionnement de ce système se présentent sous forme de deux catégories de contraintes : physiques, technologiques et techniques.

4.5.1 - Contraintes physiques

Les contraintes physiques du *ST* sont les suivantes :

- la file d'attente des cinq postes de travail ne doit pas dépasser trois plateaux (4 plateaux, incluant celui en traitement);
- la vitesse du transporteur central doit être assez élevée pour minimiser le temps de déplacement des plateaux, pendant les opérations de contournement;
- la réalisation de ce projet est limitée par le fait qu'aucun changement de la structure physique ni de la partie puissance du *ST* n'est autorisé.

4.5.2 - Contraintes technologiques et techniques

Les contraintes techniques et technologiques du *ST* sont les suivantes :

- la communication entre les contrôleurs des lecteurs de mémoires SRAM et les cartes de communication de l'*API* doit se faire en code ASCII, malgré que ces dernières puissent communiquer en MODEBUS ou UNITELWAY. Ceci est dû au fait que les lecteurs des SRAM n'acceptent que le code ASCII;
- le protocole de communication entre l'*API* et l'ordinateur de pilotage est de type UNITELWAY;
- la taille en mémoire des SRAM (8 KB);
- la taille en mémoire de l'*API* (380 KB).

4.6 - Conclusion

Ce chapitre expose une description détaillée du *ST* de l'*atelier test* du présent projet, dans l'objectif de bien clarifier le contexte dans lequel les différents programmes d'application sont réalisés. Pour ce même but, les sous-sections 4.3.2 et 4.3.3 présentent les systèmes de commande et de supervision du *ST*. Ceci permet de faciliter considérablement les opérations de conception et de réalisation des programmes de commande des gammes de production destinées à la vérification de l'efficacité des concepts d'amélioration de la flexibilité et de la robustesse des *ST* proposés dans le chapitre 3.

Ce chapitre peut servir comme référence pour tout autre utilisateur de ce *ST*, en lui facilitant l'identification et la compréhension du rôle de chacun de ses composants. La présentation des adresses d'entrées et sorties logiques de l'*API* est d'une grande utilité pour la compréhension et le déverminage des différents programmes déjà réalisés. Elle sert aussi à faciliter la conception de nouveaux programmes de commande. L'identification des câbles électriques, quant à elle, sert à faciliter et accélérer les opérations de maintenance préventive ou corrective du système de commande.

CHAPITRE 5 - PROGRAMME DE TEST DU *ST*

5.1 - Introduction

Avant de procéder à l'utilisation du *ST* pour exécuter une gamme de production quelconque, il est pertinent de s'assurer de sa capacité à accomplir correctement ses fonctions. Ce chapitre présente un programme permettant la vérification du fonctionnement de l'atelier test présenté au chapitre 4. Ce programme de test du *ST* permet d'effectuer une trajectoire dans laquelle tous les capteurs et actionneurs du système sont utilisés. Son exécution permet à l'utilisateur de s'assurer du bon fonctionnement de tous les éléments du *ST*, avant de lancer une application ou après l'exécution des opérations de maintenance.

Le programme de test du *ST* procède à l'exécution d'une *gamme-test* de production d'un seul plateau (section 5.2) et n'introduit pas l'utilisation des mémoires et leurs lecteurs. Le programme de commande de cette gamme est présenté à la section 5.3, suivi du système de supervision de celui-ci (section 5.4) avant de conclure le chapitre à la dernière section.

5.2 - Gamme-test de production

Cette section décrit les objectifs de la *gamme-test* ainsi que sa trajectoire destinée à la réalisation du programme test du *ST*.

5.2.1 - Objectifs de la *gamme-test*

La *gamme-test* de production est choisie de façon à atteindre les objectifs suivants :

- le plateau doit passer par chaque poste de travail au moins une fois;
- le plateau doit être arrêté et immobilisé dans chacun des postes de travail au moins une fois;
- la gamme doit faire en sorte que tous les capteurs et actionneurs sont utilisés au moins une fois;

- le transporteur principal et celui de l'entrée doivent fonctionner durant toute la période du test;
- le transporteur central doit tourner dans chacun des sens (est et ouest) au moins une fois;
- les convoyeurs des stations de transfert doivent être utilisés de façon que chacun tourne dans le, ou les deux, sens de rotation qui lui sont possibles.

5.2.2 - Présentation de la gamme-test utilisée

La *gamme-test* adoptée est la suivante : P1 – P2 – P3 – P4 – P5 – P3 – P1 – P4 – P3. Cette gamme utilise tous les composants du *ST*, ce qui représente un moyen efficace de l'évaluation du bon fonctionnement de ces éléments, validant ainsi la disponibilité du *ST* à être utilisé sans aucun problème. Le tableau 5.1 montre le détail de la trajectoire suivie par le plateau (voir figure 5.1) pour chacun des segments de la *gamme-test*. La figure 5.1 présente la trajectoire suivie par le plateau durant l'exécution du programme test du *ST*, soit les segments de 1 à 10.

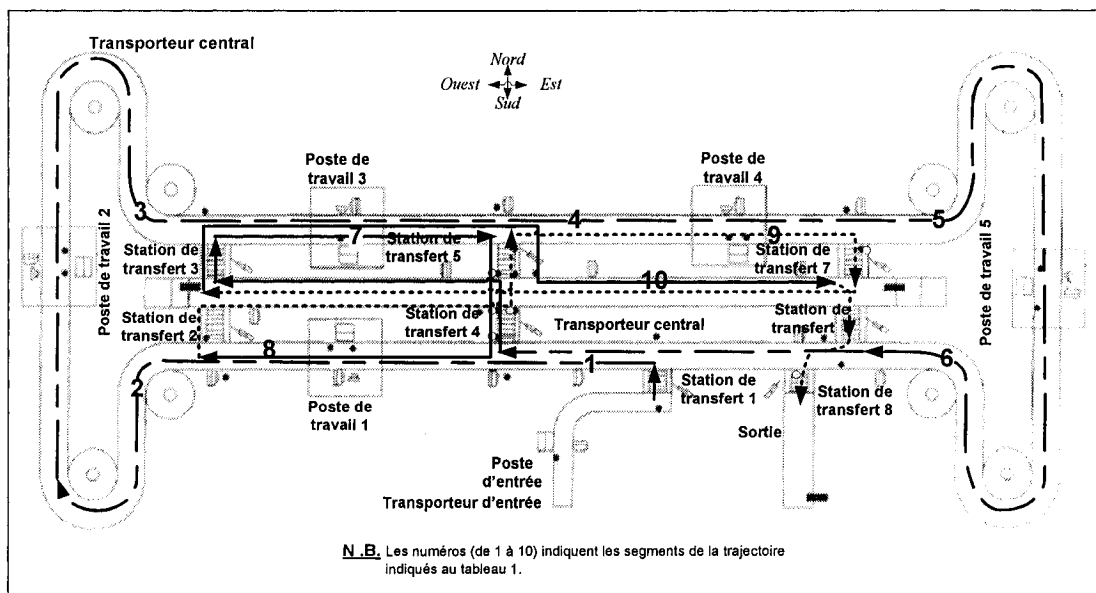


Figure 5. 1. Trajectoire du programme de test du *ST*

Tableau 5. 1. Trajectoire de la *gamme-test*

Segment de trajectoire	Trajectoire empruntée
Entrée – P1 (segment 1)	- Transporteur d'entrée - Station de transfert 1 (rotation vers le nord) - Transporteur principal
P1 – P2 (segment 2)	Transporteur principal
P2 – P3 (segment 3)	Transporteur principal
P3 – P4 (segment 4)	Transporteur principal
P4 – P5 (segment 5)	Transporteur principal
P5 – P3 (segment 6)	- Transporteur principal - Station de transfert 4 (rotation vers le nord) - Transporteur central (rotation vers l'ouest) - Station de transfert 3 (rotation vers le nord) - Transporteur principal
P3 – P1 (segment 7)	- Transporteur principal - Station de transfert 5 (rotation vers le sud) - Station de transfert 4 (rotation vers le sud) - Transporteur principal
P1 – P4 (segment 8)	- Transporteur principal - Station de transfert 2 (rotation vers le nord) - Transporteur central (rotation vers l'est) - Station de transfert 5 (rotation vers le nord) - Transporteur principal
P4 – P3 (segment 9)	- Transporteur principal - Station de transfert 7 (rotation vers le sud) - Transporteur central (rotation vers l'ouest) - Station de transfert 3 (rotation vers le nord) - Transporteur principal
P3 – Sortie (segment 10)	- Transporteur principal - Station de transfert 5 (rotation vers le sud) - Transporteur central (rotation vers l'est) - Station de transfert 6 (rotation vers le sud) - Transporteur principal - Station de transfert 8 (rotation vers le sud) - Transporteur de sortie

5.3 - Programmes de commande et système de supervision

5.3.1 - Programmes de commande

Le *programme test* du *ST* est composé d'un programme principal et 16 sous-programmes permettant la commande séparée de chacun des postes de travail et des

stations de transfert ainsi que les trois transporteurs motorisés, soit le transporteur principal, central et celui de l'entrée. Les rôles de chacun de ces programmes sont présentés ci-dessous :

- un programme principal : permet la communication et la gestion des sous-programmes;
- six sous-programmes des postes de travail et d'entrée : chacun de ces sous-programmes permet l'exécution et la commande des opérations qui se font au niveau du poste correspondant;
- un sous-programme des transporteurs principal et d'entrée: permet la mise en œuvre ou l'arrêt simultané de ces deux transporteurs;
- un sous-programme du transporteur central : permet l'exécution et la commande des opérations faites par le transporteur central, soit la rotation vers l'est ou vers l'ouest;
- huit sous-programmes des stations de transfert : chacun de ces sous-programmes permet l'exécution et la commande des opérations qui se font à la station de transfert qui lui correspond.

La figure 5.2 présente un diagramme qui illustre la communication entre ces programmes.

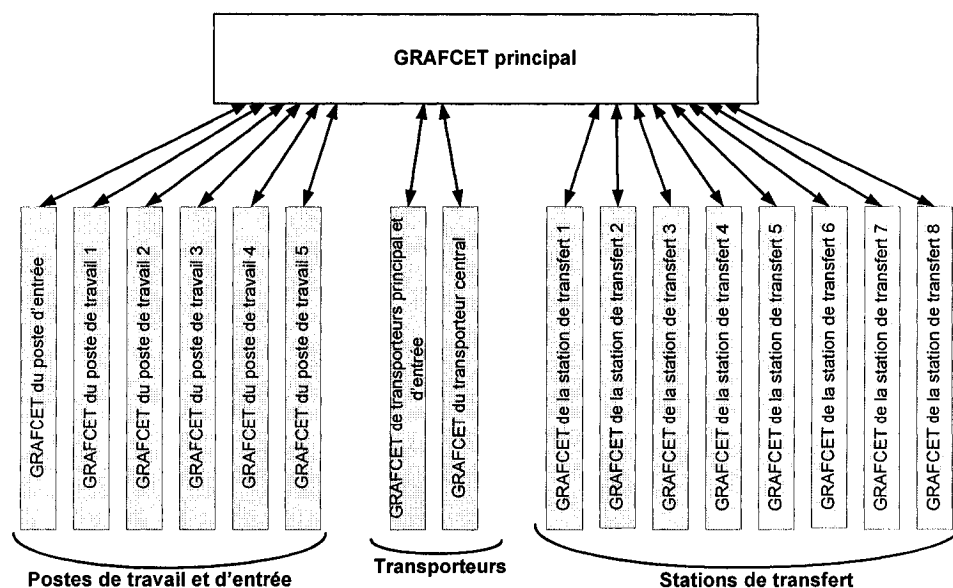


Figure 5. 2. Communication entre les programmes du *programme Test*

La figure 5.2 met en évidence la commande séparée de chacune des unités de travail (voir la sous-section 3.3.1). La conception des GRAFCET et la réalisation des programmes de l'*API* sont faites en appliquant les notions de la sous-section 3.3.2 du troisième chapitre, concernant la décomposition logique des programmes de commande et leur réutilisation. Les programmes de commande des postes de travail et des stations de transfert sont particulièrement basés sur l'application de la réutilisation. En fait, pour les postes de travail, dès que le programme d'un poste est réalisé, il peut être réutilisé pour les autres postes, avec des changements mineurs. Ces changements se limitent aux adresses des entrées et sorties de chacune de ses ressources. Les stations de transfert, eux aussi, subissent le même processus.

5.3.2 - Système de supervision du programme test

Le système de supervision permet d'informer l'utilisateur (superviseur) sur l'état du *ST* et de faire le suivi, en temps réel, du déplacement du plateau pendant l'exécution du *programme test*. L'écran de supervision est présenté à la figure 5.3.

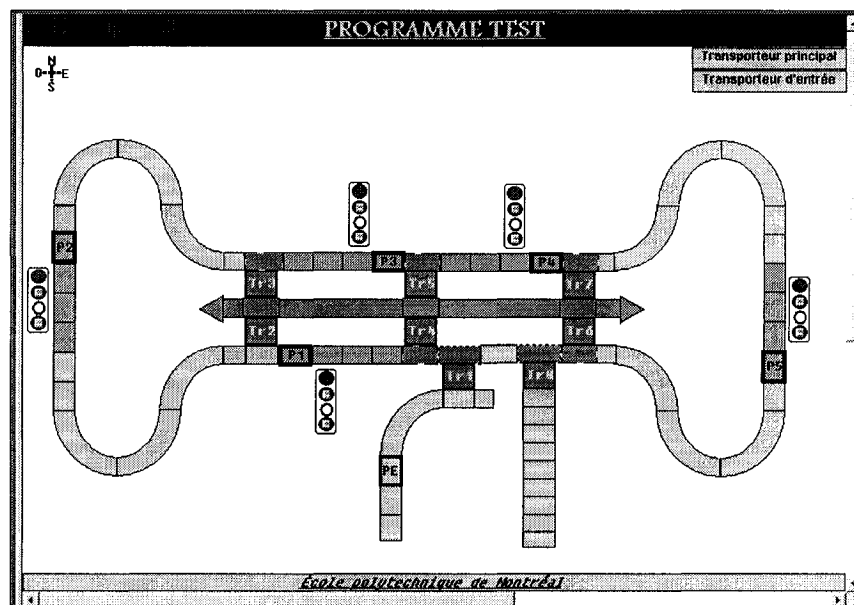


Figure 5. 3. Écran du système de supervision du *programme test*

5.5 - Conclusion

Ce chapitre expose un programme test permettant de vérifier le bon fonctionnement de tous les capteurs et actionneurs du *ST*, en exécutant une gamme de production qui fait appel à tous ces éléments. Ce programme représente un moyen efficace de vérification du bon fonctionnement du *ST* après des interventions de maintenance préventive ou corrective.

L'utilisation du programme test permet d'éviter les pertes du temps qui peuvent être occasionnées par le lancement d'exécution d'une gamme de production en présence de dysfonctionnement ignoré de certaines ressources du *ST*. Ces pertes sont dues principalement au temps de déchargement du système, suite à la détection tardive d'une défectuosité.

Dans le cas d'une extension du *ST* par l'ajout de nouveaux éléments, le programme test doit être modifié en conséquence. Cette modification consiste à introduire les nouvelles ressources dans la gamme de production de ce programme pour permettre de tester leur bon fonctionnement à chaque fois que celui-ci est exécuté.

CHAPITRE 6 – MODE SEMI-AUTOMATIQUE

6.1 - Introduction

Le présent chapitre met en application et vérifie l'efficacité des concepts et méthodes proposés dans le chapitre 3, en réalisant les programmes de commande de plusieurs gammes de production dans l'atelier test (chapitre 4). La validation du bon fonctionnement de cet atelier est effectuée avec le programme test (chapitre 5). Les applications sont réalisées dans le cadre du fonctionnement du *ST* en mode semi-automatique. Ce mode de fonctionnement est destiné à la production en série ou par lots, où chacun des lots a sa propre gamme de production. En fait, ce mode de fonctionnement englobe l'ensemble des programmes correspondant à toutes les gammes de production utilisées par une entreprise. Par conséquent, chacune de ces gammes a son propre programme de commande qui exécute la manutention des produits en suivant la trajectoire de la gamme correspondante, permettant ainsi d'avoir un important gain de temps en ne passant que par les postes qui figurent dans la gamme de production.

Dans le mode semi-automatique, une seule gamme de production est utilisée à la fois. Ainsi, seul les produits dont la production s'exécute selon celle-ci sont traités dans le *ST*. À la fin de la production du lot relatif à cette gamme, le programme du lot suivant est téléchargé, pour lancer son exécution. Grâce à la répartition des programmes selon les gammes de production, le temps de téléchargement à l'*API* sont réduits, ne causant ainsi que des retards minimes. Cette opération ne dure que quelques dizaines de secondes, selon la taille du programme à télécharger et les performances de l'ordinateur utilisé.

Le mode de fonctionnement semi-automatique est conçu de façon à améliorer la flexibilité du *ST*, tout en conservant une grande robustesse. Cette dernière est améliorée grâce aux stratégies de contournement des situations de blocage et aux *programmes alternatifs* de fonctionnement. Ces programmes sont proposés pour chacune des gammes de production offrant cette possibilité en ayant plus qu'une trajectoire possible.

L'amélioration de la flexibilité se manifeste par le fait que le *ST* peut s'adapter facilement à la production de nouveaux types de produits en offrant des méthodes qui facilitent la conception et la réalisation des programmes tout en permettant de réduire les temps de manutention et d'attente sans valeur ajoutée. Cela est offert grâce à la stratégie de programmation basée sur la segmentation, la validation et la réutilisation des programmes de commande.

Les principaux objectifs du mode semi-automatique sont les suivants :

- offrir des programmes qui améliorent la flexibilité du *ST*, en facilitant son adaptation aux nouvelles gammes de production;
- améliorer la robustesse du *ST*, en évitant les problèmes de blocage, dans les cas échéants;
- minimiser les temps d'attente des plateaux dans le système : méthodes de gestion des files d'attente aux postes de travail, dans les situations de blocage;
- minimiser les distances parcourues par les plateaux par des méthodes de contournement des postes de travail qui ne font pas partie de la gamme de production en exécution.

N.B. la réduction des temps et des distances ne consiste pas à trouver des solutions optimales, mais à trouver des solutions faisables tout en essayant d'améliorer ces deux aspects.

La deuxième section de ce chapitre porte sur les phases de manutention des plateaux. La procédure de réalisation des programmes est présentée à la troisième section, suivi d'une analyse des gammes de production à programmer (section 6.4). La cinquième section couvre la réalisation des programmes de commande.

6.2 - Phases de manutention des plateaux

Cette section présente les trois principales phases de manutention des plateaux durant le fonctionnement du système en mode semi-automatique ainsi que le problème de situations de blocage.

6.2.1 - Entrée d'un plateau dans le *ST*

Les plateaux sont premièrement introduits dans le système via le transporteur d'entrée qui les achemine vers le poste d'entrée. Ainsi, un plateau peut être libéré de ce poste dès que les conditions suivantes sont satisfaites :

- file d'attente du premier poste de travail figurant sur la gamme de production inférieure à 4 plateaux;
- station de transfert de l'entrée disponible.

6.2.2 - Trajectoires suivies par les plateaux en mode semi-automatique

En mode de fonctionnement semi-automatique, chaque gamme de production a son propre programme. Par conséquent, la trajectoire suivie par les plateaux dépend de leurs gammes de production.

6.2.3 - Évacuation des plateaux du *ST*

En mode semi-automatique, l'évacuation d'un plateau du *ST* se fait d'une manière automatique, juste après son passage par le dernier poste de travail de la gamme de production. En fait, dès qu'un plateau est traité à son dernier poste de travail, il est manutentionné vers la station de transfert de sortie (ST8) qui procède à son évacuation vers la sortie du système, aussitôt que les conditions de libérations du plateau sont satisfaites. Ces conditions sont les suivantes :

- évacuation demandée via l'actionnement du bouton poussoir du dernier poste de travail de la gamme de production;
- disponibilité de la sortie du *ST* (sortie non saturée);
- autorisation d'exécuter l'opération de transfert à partir du poste de travail vers la sortie du système, dès qu'aucune autre opération de transfert pouvant causer un chevauchement de trajectoires avec celle-ci n'est en cours.

6.3 - Procédure de réalisation et contraintes des programmes

Cette section présente la procédure de réalisation et les contraintes des programmes de commande du *ST*, en mode semi-automatique.

6.3.1 - Procédure de réalisation des programmes de commande

La réalisation des programmes de commande, pour chacune des gammes de production, consiste à suivre les étapes suivantes :

- 1) concevoir un programme pour chaque unité de travail, nécessaire pour l'exécution de la trajectoire de la gamme de production;
- 2) concevoir les programmes de transfert de plateaux;
- 3) concevoir un programme principal dont la tâche principale est de lancer l'exécution des autres programmes et de procéder à leurs arrêts;
- 4) établir les différents liens de communication entre l'ensemble des programmes.

Les programmes de transfert consistent à exécuter les opérations de transfert des plateaux entre chaque paire de postes de travail successives dans une gamme de production. Une fois qu'un programme de ce type est conçu et validé, il peut être réutilisé par tout autre gamme faisant appel à la même opération de transfert. Cette propriété de réutilisation de programmes offre un gain de temps important lors de la conception de nouveaux programmes utilisant des programmes de transfert déjà réalisés et validés. Il suffit de copier le GRAFCET et le programme des actions correspondant depuis le programme de transfert en question, et de les coller dans le nouveau programme dont la réalisation est en cours.

6.3.2 - Contraintes des programmes de commande

Les programmes de fonctionnement en mode semi-automatique doivent respecter les contraintes suivantes :

- la file d'attente d'un poste de travail ne doit pas dépasser 4 plateaux, incluant celui du poste de travail;
- le poste d'entrée ne peut libérer un plateau qui s'y trouve que si la file d'attente du premier poste de la gamme de production est inférieure à 4 et la station de transfert d'entrée (ST1), permettant d'amener les plateaux vers le transporteur principal, est disponible;
- avant la libération d'un plateau à partir d'un poste de travail, celui-ci doit vérifier la validité de la file d'attente du poste subséquent dans la gamme de production et s'assurer de la satisfaction des conditions de libération du plateau, pour éviter le chevauchement de la trajectoire de celui-ci avec un autre plateau en attente de libération. Cela permet d'éviter les problèmes de blocage;
- vérifier les possibilités de blocage dans chacune des gammes de production, et prévoir des stratégies pour les éviter, dans le cas échéant;
- le dernier poste de travail de la gamme de production ne peut libérer un plateau qui s'y trouve que lorsque la station de transfert de sortie (ST8) est disponible. Cela permet d'éviter le débordement de celle-ci;
- la station de transfert de sortie doit vérifier la disponibilité de la sortie du *ST* avant de procéder à l'opération d'évacuation des plateaux;
- à la fin du traitement d'un plateau à un poste de travail, sa libération est conditionnée par l'actionnement du bouton poussoir du poste de travail en question.

Dans le cas où les opérations dans ce poste se font uniquement par un système automatisé ou un robot (pas d'opérateur), la libération du plateau se fait avec un bit qui sera mis à 1 par ce système lors de la fin des opérations de traitement. Le signal provenant de ce bit va remplacer celui du bouton poussoir.

6.4 - Présentation et analyse des gammes de production à programmer

La partie application consiste à concevoir et à réaliser des programmes de commande pour des exemples des gammes de production suivantes :

- gamme de production sans retour en arrière (programmes initial et alternatif);

- gamme de production avec retour en arrière et situations de blocage;
- gamme de production avec retour en arrière, situations de blocage et utilisation multiple d'un poste de travail.

6.4.1 - Gamme sans retour en arrière

La gamme de production proposée dans cette catégorie est la suivante : P1 – P4 – P5. Dans la présente gamme, les plateaux se déplacent dans le sens de la direction du transporteur principal, sans aucun retour en arrière. Ainsi, il n'y aura pas de problème de blocage car les produits circulent toujours en suivant un seul sens (voir la sous-section 3.4.1 du chapitre 3). Pour cette gamme, deux trajectoires parcourant une distance minimale sont possibles. Ainsi, deux programmes, exécutant chacun une trajectoire différente, sont réalisés : un *programme initial* qui passe par le poste de travail P3 et un *programme alternatif* qui contourne ce poste de travail, empruntant ainsi une autre trajectoire. Les trajectoires de ces deux programmes sont illustrées respectivement aux figures 6.1 et 6.2.

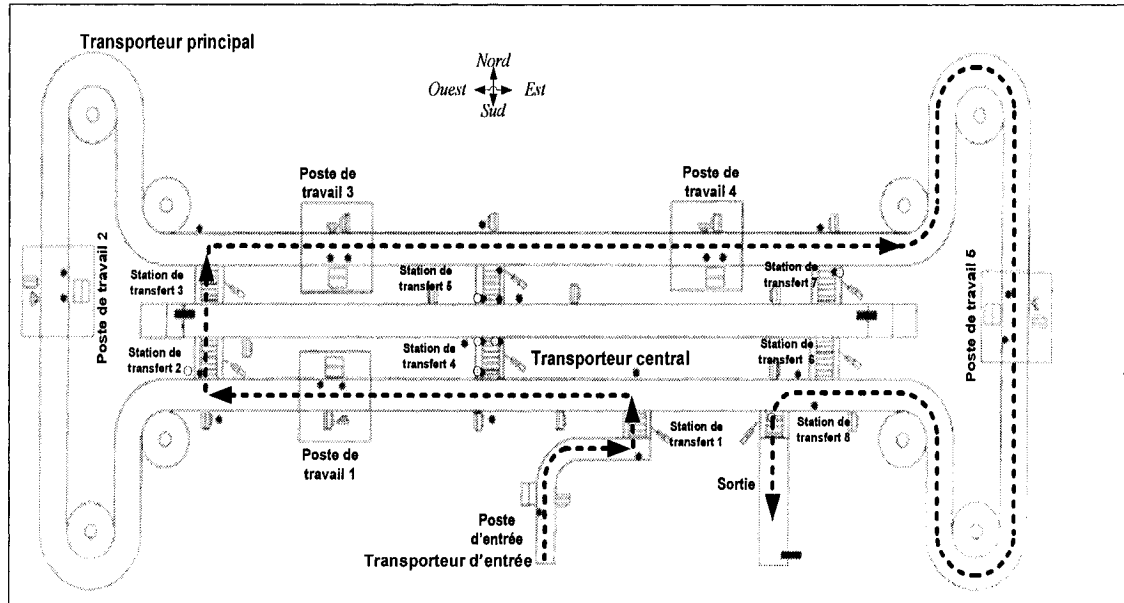


Figure 6. 1. Trajectoire du programme initial de la gamme de production P1 – P4 – P5

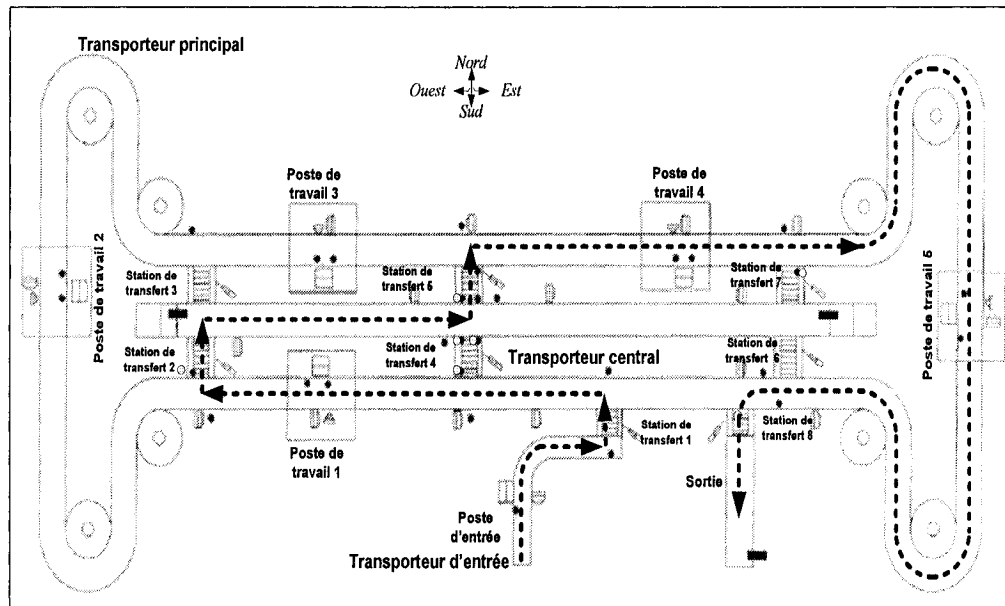


Figure 6. 2. Trajectoire du programme alternatif de la gamme de production P1 – P4 – P5

6.4.2 - Gamme avec retour en arrière (avec situations de blocage)

La gamme de production proposée dans cette catégorie est la suivante: P1 – P4 – P3. Dans cette gamme, les plateaux auront à faire des déplacements dans le sens croissant et décroissant de l'emplacement des postes de travail. Les retours en arrière se manifestent par le déplacement des plateaux du poste de travail P4 vers P3. Cela justifie la possibilité d'avoir des situations de blocage. Pour en faire la vérification, les étapes de la méthode proposée à la sous-section 3.4.3 sont suivies.

N.B. Dans cette gamme, il n'y a qu'une seule trajectoire intéressante (voir le paragraphe de *Comparaison et sélection de trajectoires*). Pour cette raison, il n'y a pas de programme alternatif.

Vérification de situation de blocage dans la gamme P1 – P4 – P3.

La première étape consiste à proposer les trajectoires possibles pour réaliser la gamme en question. Deux trajectoires sont proposées.

Trajectoire 1 :

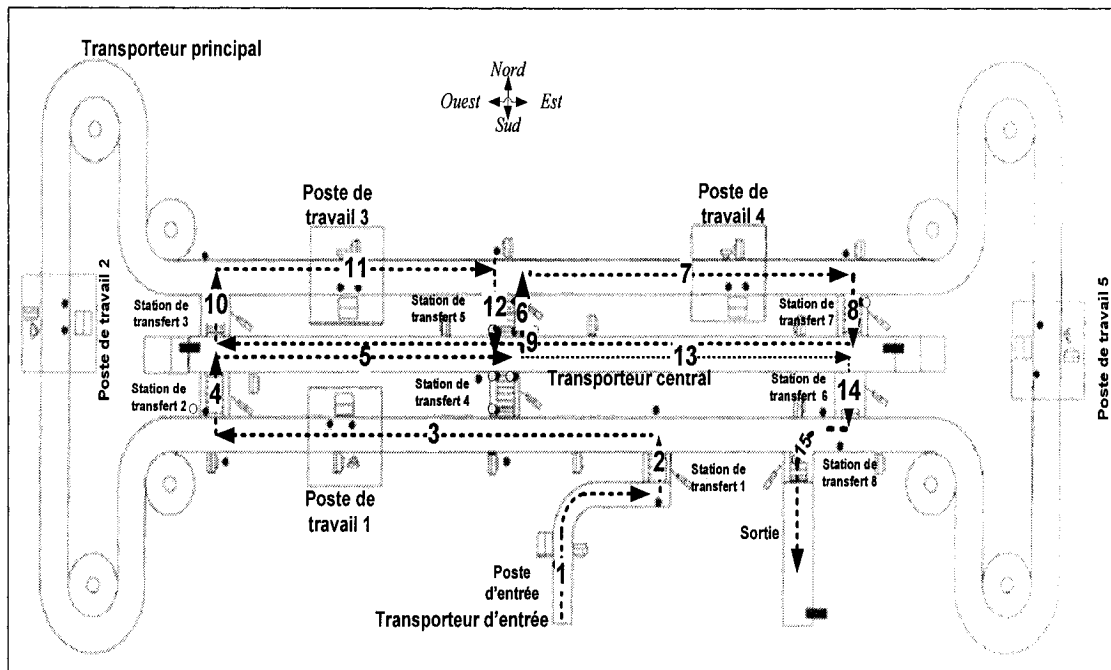


Figure 6. 3. Trajectoire 1

Localisation des chevauchements dans la trajectoire 1 La localisation des chevauchements consiste à identifier les ressources (transporteurs et convoyeurs des stations de transfert) utilisées dans deux sens de déplacement. Celles-ci sont susceptibles de causer des situations de blocage. Ces ressources et leurs sens de déplacements exigés par la trajectoire 1 sont présentés dans le tableau 6.1.

Tableau 6. 1. Les entités à la source des situations de blocage (trajectoire 1)

Entités	Les sens de déplacements utilisés
Station de transfert 5	- Rotation vers le nord: segment 6 - Rotation vers le sud: segment 12
Transporteur central	- Rotation vers l'est: segments 5 et 13 - Rotation vers l'ouest: segment 9

Dans cette trajectoire, la station de transfert ST5 et le transporteur central seront sollicités à faire des déplacements dans leurs deux sens de rotation. Cela peut causer des

situations de blocage dans le cas où l'une de ces entités reçoit deux demandes simultanées pour exécuter des déplacements dans deux sens différents.

Explication des situations de blocage

Pour mettre en évidence les éventuelles situations de blocage, prenons la situation suivante (voir figure 6.4) : un plateau PL1 localisé au poste de travail 1 (destination : poste de travail 4), un plateau PL2 localisé au poste de travail 4 (destination : poste de travail 3) et un plateau PL3 localisé au poste de travail 3 (destination : sortie du système). Les trois plateaux auront à quitter leurs postes d'origines pour se diriger vers leurs destinations. Dans ce contexte, deux situations de blocage peuvent survenir.

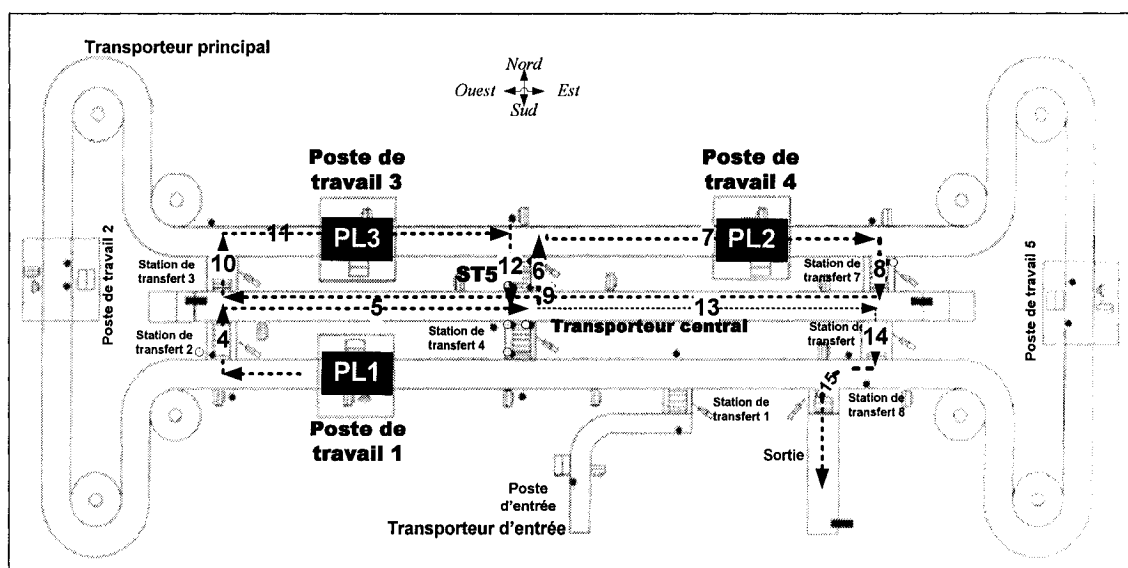


Figure 6. 4. Localisation des trois plateaux PL1, PL2 et PL3

Blocage au niveau de la station de transfert 5 (ST5) :

Pour se rendre à leurs destinations, le plateau PL1 doit se rendre au poste de travail 4 en empruntant les segments : 4, 5, 6 et 7, tandis que PL3 va emprunter les segments 11, 12, 13, 14 et 15. Dans ce contexte, on peut se trouver avec PL1 qui veut commencer, ou il est en train de se déplacer le long du segment 6 entraînant ST5 dans un déplacement vers le **nord**, alors que le plateau PL3 est rendu au segment 12 qui sollicite ST5 pour un déplacement vers le **sud**. Si une telle situation se produit, le moteur du convoyeur de la station de transfert va recevoir deux ordres contradictoires en lui demandant,

simultanément, deux sens de rotations différentes. Cette situation causera un blocage de l'exécution du programme.

Un autre problème peut arriver, dans le cas où le convoyeur de ST5 déplace un plateau dans un sens alors qu'un autre plateau se présente dans la direction du mouvement de ST5, causant ainsi un blocage physique de l'évacuation du premier plateau (figure 6.5). Pour éviter ce problème, un système physique de sécurité est utilisé : la sortie Nord de ST5 est équipée d'un vérin pneumatique **Tr5ev3** (figure 6.6), permettant de bloquer les plateaux qui peuvent y arriver pendant qu'elle est en train d'exécuter une opération de transfert. Quant à la sortie Sud de ST5, elle est équipée de deux vérins **Tr4-5 ev4**, un à gauche et l'autre à droite qui servent à bloquer les plateaux provenant des deux côtés du transporteur central (figure 6.6).

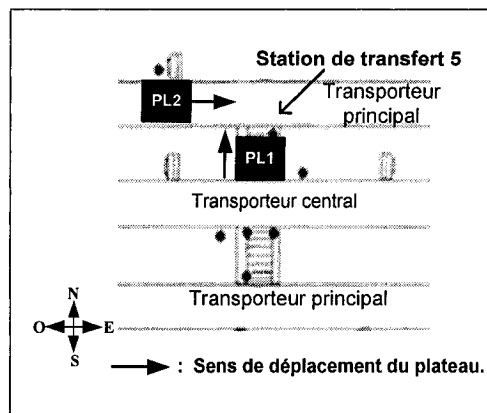


Figure 6. 5. Blocage physique au niveau de la station de transfert ST5

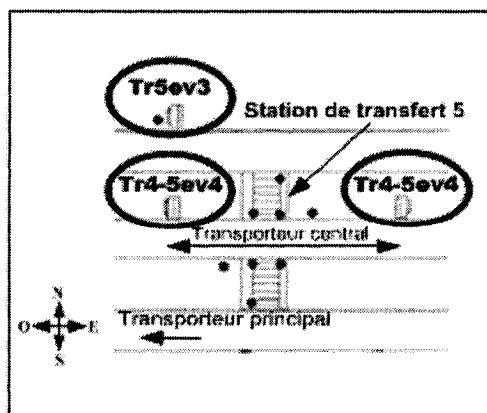


Figure 6. 6. Éléments permettant d'éviter le blocage physique au niveau de ST5

En ce qui concerne le contournement logique (au niveau programmes de commande) de ces deux problèmes de blocage, les plateaux dont la destination est la sortie du système sont toujours priorités. Ainsi, dans l'exemple de la figure 6.4, s'il y a une demande de libération simultanée des postes P3 et P4, le poste de travail P3 a la priorité de libérer son plateau PL3, car la destination de ce dernier est la sortie du système.

Blocage au niveau du transporteur central :

Au niveau du transporteur central, deux cas de chevauchements causant des situations de blocage peuvent se présenter.

1- Chevauchement des trajectoires de plateaux quittant simultanément P1 et P4 :

En considérant la même situation présentée à la figure 6.4, le plateau PL1 quittant le poste de travail P1 doit emprunter les segments 4, 5, 6 et 7 pour se rendre au poste P4, et PL2 doit emprunter les segments 8, 9 et 10 pour se rendre à sa destination (P3).

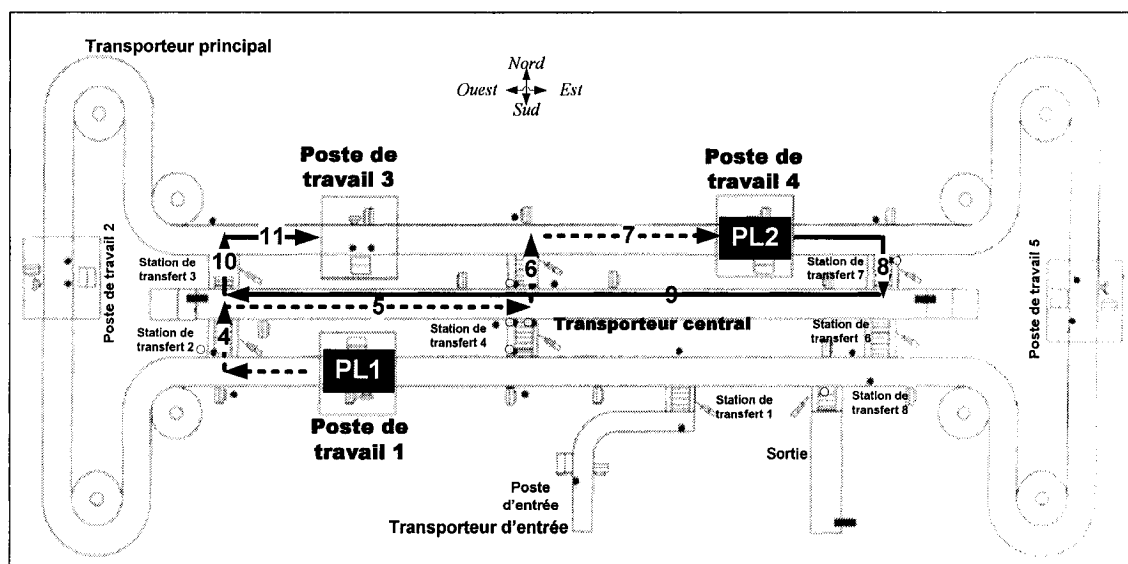


Figure 6. 7. Chevauchement des trajectoires de plateaux quittant simultanément P1 et P4

Comme illustré à la figure 6.7, en empruntant le segment 5, le plateau PL1 exige un déplacement de l'ouest vers l'est via le transporteur central, tandis que PL2 sollicite ce même transporteur pour un déplacement de l'est vers l'ouest, en empruntant le segment 9. Dans une telle situation, le transporteur ne peut pas répondre simultanément à ces

deux opérations contradictoires (déplacement de l'ouest vers l'est et de l'est vers l'ouest), et il ne répond à aucune de ces demandes, causant ainsi une situation de blocage.

2 - Chevauchement des trajectoires de plateaux quittant simultanément P3 et P4 (PL3 et PL2) : cette situation est similaire à celle entre PL1 et PL2. Le problème de blocage est aussi au niveau du transporteur central et est causé par le segment 13 de la trajectoire du plateau PL3 et du segment 9 de celle de PL2 (figure 6.8). En sachant que le plateau destiné à quitter le *ST* a toujours la priorité, le programme doit vérifier si la sortie du *ST* est disponible. Si c'est le cas, PL3 aura la priorité de quitter son poste de travail (P3) même si P4 présente une demande simultanée de libérer le plateau PL2.

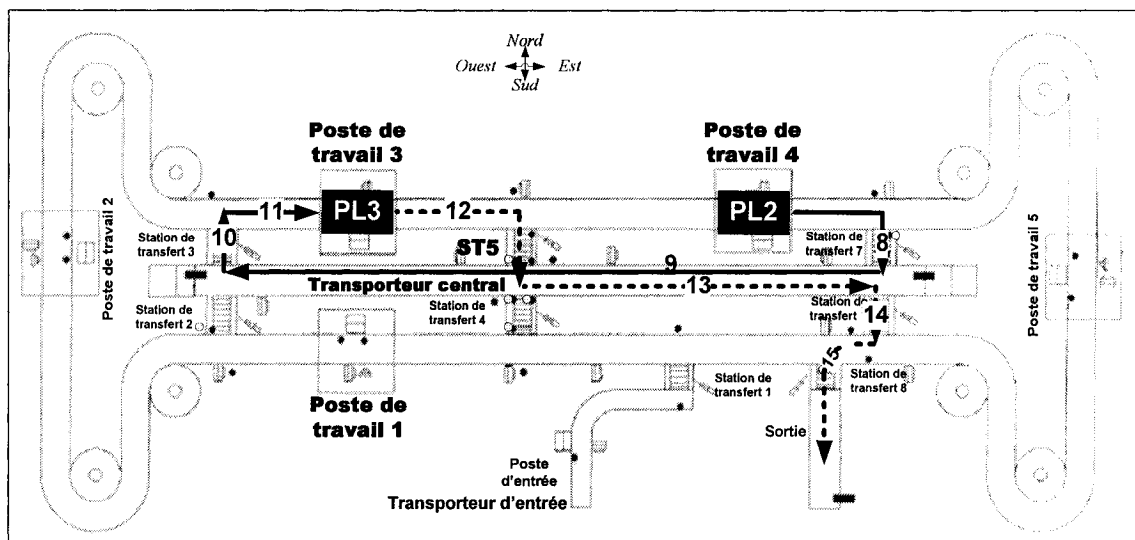


Figure 6. 8. Chevauchement des trajectoires de plateaux quittant simultanément P3 et P4

À ce stade, les trois situations possibles de blocage ont été présentées :

- le blocage entre P1 et P3 (plateaux PL1 et PL3) est évité en priorisant le poste de travail P3 car ses plateaux sont destinés à la sortie du système;
- le blocage entre P4 et P3 (plateaux PL2 et PL3) est évité en priorisant le poste de travail P3 pour la même raison que le premier cas;
- le blocage entre P1 et P4 (plateaux PL1 et PL2) va être géré d'une façon plus dynamique pendant l'exécution du programme. La priorité est attribuée à l'un ou

l'autre de ces postes de travail, en utilisant la méthode de gestion de blocage, présentée à la sous-section 3.4.4. Le paragraphe suivant explique la démarche suivie par le programme dans le cas où les deux plateaux PL1 et PL4, présentés à la figure 6.7, soumettent simultanément une demande de quitter leurs postes de travail.

Pour gérer le blocage entre les postes de travail P1 et P4, dans le cas d'une demande simultanée de libération des plateaux de ces deux postes, le programme procède ainsi :

- 1) comparer les files d'attente des postes de destinations des plateaux PL1 et PL2, respectivement les postes de travail P4 et P3;
- 2) donner la priorité au poste de travail dont le poste de destination représente la file d'attente la plus courte, si ces files d'attente sont égales, le programme exécute les étapes suivantes :
 - 1) comparer les files d'attente des postes de travail P1 et P4;
 - 2) donner la priorité au poste de travail dont la file d'attente est la plus longue, en autorisant au plateau qui s'y trouve de le quitter;
 - 3) si les deux files d'attente de l'étape et la sous-étape 1 sont égales, le programme donne la priorité au poste P1, car dans l'exemple (gamme P1-P4- P3) il a été supposé que le temps d'opération de P1 est supérieur à celui de P4.

Ces étapes sont résumées dans l'organigramme de la figure 6.9.

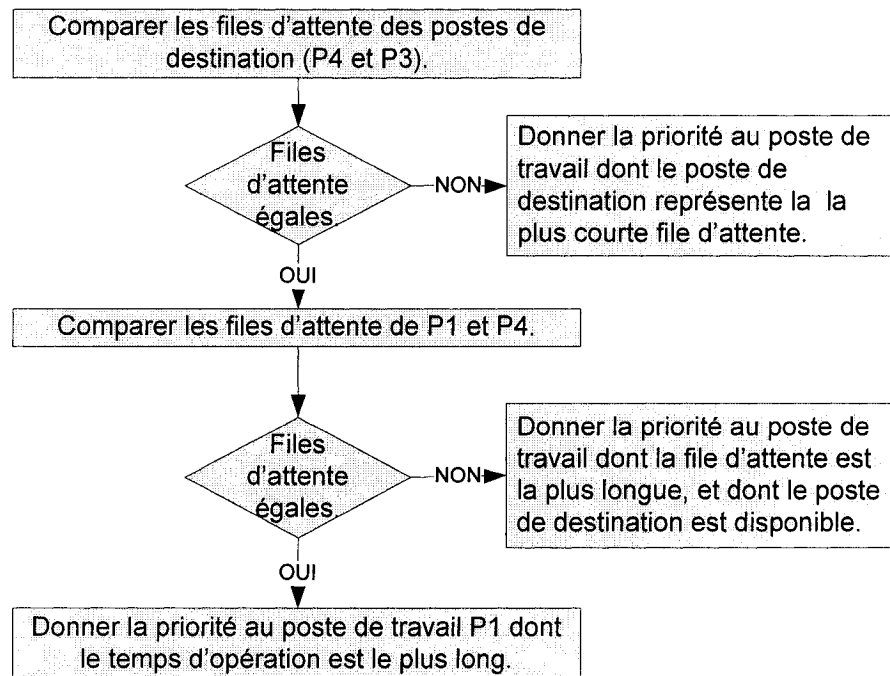


Figure 6. 9. Organigramme de gestion de priorité de libération de plateaux entre les poste P1 et P4

Trajectoire 2 :

La deuxième trajectoire (figure 6.10) est différente de la première car elle utilise des ressources différentes.

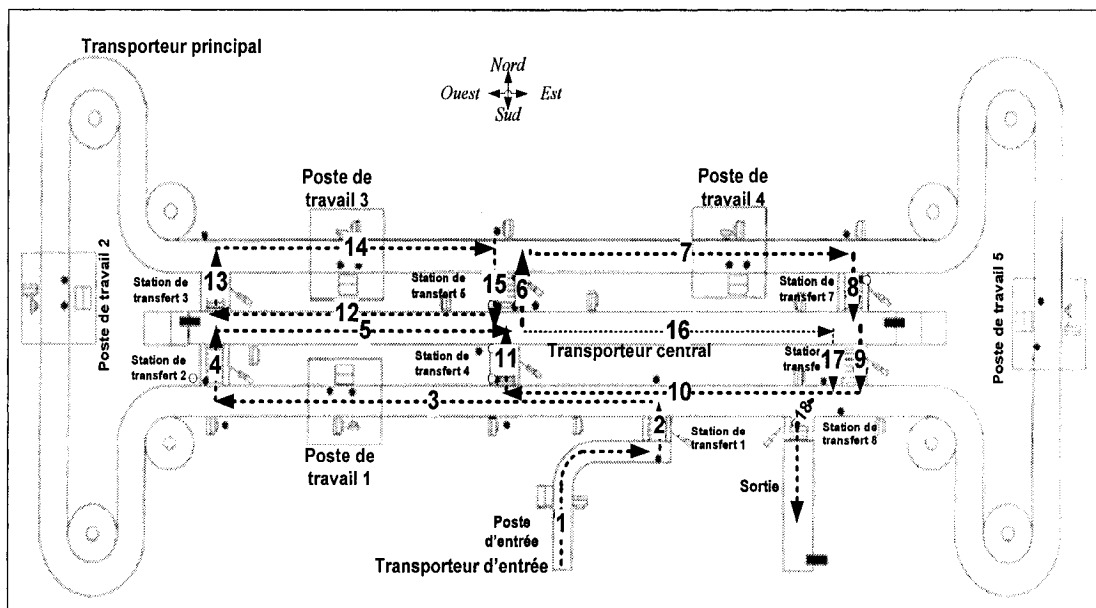


Figure 6. 10. Trajectoire 2

Localisation des chevauchements dans la trajectoire 2

Le tableau 6.2 indique les entités utilisées dans deux sens de déplacement et pouvant causer des situations de blocage.

Tableau 6. 2. Les entités à la source des situations de blocage (trajectoire 2)

Entités	Les sens de déplacements utilisés
Station de transfert ST5	- Déplacement vers le nord: segment 6 - Déplacement vers le sud: segment 15
Transporteur central	- Déplacement vers l'est: segments 5 et 16 - Déplacement l'ouest: segment 12

La 2^e trajectoire est analysée de la même manière que la trajectoire 1. Celle-ci présente deux possibilités de blocage : une au niveau de la station de transfert ST5, causée par le déplacement des plateaux le long des segments 6 et 15, et une autre au niveau du transporteur central, à cause des segments 5 et 12 ou 16 et 12. Ceci signifie que la deuxième trajectoire représente les mêmes situations de blocage que la première (un blocage au niveau de la station ST5 et deux au niveau du transporteur central).

Comparaison et sélection de trajectoires

Pour faire le choix d'une des trajectoires, ou les garder toutes les deux (avec une comme version initiale et l'autre alternative), il faut comparer les ressources utilisées et le nombre de situations de blocage pour chacune d'elles. L'ensemble des ressources utilisées par chacune des deux trajectoires est présenté au tableau 6.3.

Tableau 6. 3. Ressources utilisées par chacune des deux trajectoires

Trajectoire	Ressources utilisées
Trajectoire 1	- Transporteur d'entrée - Transporteur principal - Transporteur central - Poste d'entrée - Postes de travail 1, 3 et 4 - Stations de transfert 2, 3, 5, 6, 7 et 8
Trajectoire 2	- Transporteur d'entrée - Transporteur principal - Transporteur central - Poste d'entrée - Postes de travail 1, 3 et 4 - Stations de transfert 2, 3, 4, 5, 6, 7 et 8

L'analyse du tableau 6.3 met en évidence le fait que la trajectoire 2 utilise une ressource de plus que la première : la station de transfert ST4. En outre, elle présente autant de situations de blocage que la 1^{re} trajectoire. Pour ces raisons, **uniquement la trajectoire 1 est retenue.**

6.4.3 - Gamme à utilisation multiple d'un poste de travail

La gamme de production traitée dans cette sous-section est celle utilisée dans la sous-section 3.4.5 pour expliquer la problématique de gestion d'orientations d'un poste à utilisations multiples : P1- P4 - P3 - P4 - P5.

La trajectoire utilisée pour cette gamme est la suivante :

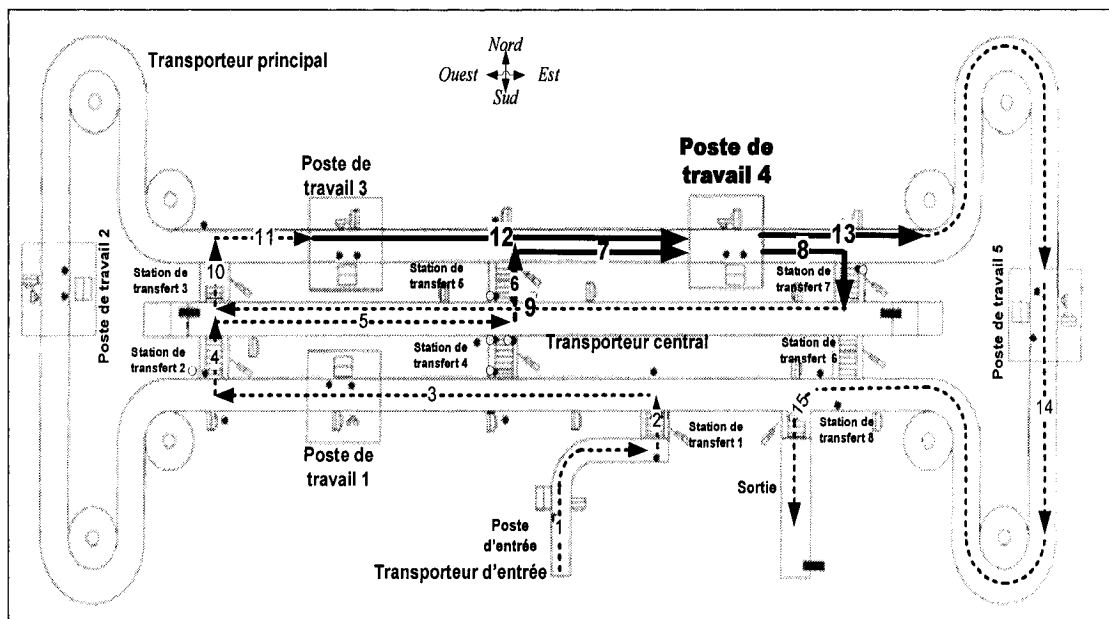


Figure 6.11. Trajectoire de la gamme P1- P4 – P3 – P4 – P5

Les segments 7 et 12 sont communs aux trajectoires des plateaux qui arrivent au poste P4, respectivement en provenance des postes de travail P1 et P3, tandis que les segments 8 et 13 représentent respectivement les trajectoires des plateaux qui quittent P4 vers P3 et P5, c'est à ce niveau que la logique d'orientation des plateaux, présentée à la sous-section 3.4.5, va servir pour diriger les plateaux selon les segments 8 ou 13 en fonction de leurs provenances. Dans cette gamme, une seule situation de blocage se présente : un plateau en provenance du poste P1 qui emprunte le segment 5 et au même moment, un autre en provenance du poste P4 empruntant le segment 9. Cette situation de blocage est déjà traitée dans la sous-section 6.4.2 (gamme avec retours en arrière : P1- P4 - P3).

Tous les cas de figures des concepts proposés au chapitre 3 ont été présentés dans cette section (5.5). L'étape suivante consiste à faire la réalisation des programmes de commande pour mettre en application et vérifier la validité des méthodes proposées dans le troisième chapitre pour l'amélioration de la flexibilité et de la robustesse des ST.

6.5 - Réalisation des programmes de commande

Cette section est consacrée à la réalisation des programmes de commande des gammes de production présentées à la section 6.4.

6.5.1 - Gamme sans retour en arrière (P1 – P4 – P5)

Pour effectuer cette gamme de production, deux programmes sont proposés :

- programme initial, permettant de contourner le poste de travail P3;
- programme alternatif, qui passe par P3 sans s'y arrêter.

Programme initial de la gamme P1 – P4 – P5

Ce programme est composé d'un programme principal et de plusieurs sous-programmes. En fait, chacune des unités de travail utilisées dans cette gamme de production a son propre sous-programme de commande. Ainsi, les programmes suivants sont utilisés :

- trois sous-programmes destinés à commander séparément chacun des postes de travail utilisés dans cette gamme de production : P1, P4 et P5;
- un sous-programme destiné à la commande du poste d'entrée;
- trois sous-programmes destinés à commander chacune des stations de transfert utilisées pour effectuer la trajectoire du programme initial : ST1, ST2, ST5 et ST8;
- un sous-programme pour la commande du transporteur central;
- un sous-programme pour la commande du transporteur principal et celui de l'entrée;
- un programme principal, permettant de gérer le démarrage et l'arrêt du système.

Programme alternatif de la gamme P1 – P4 – P5

Les ressources utilisées dans ce programme sont quasiment identiques à celles du programme initial avec les différences suivantes :

- le transporteur central et la station de transfert ST5 ne sont pas utilisés;
- la station ST3 est utilisée.

La réalisation du programme alternatif est beaucoup plus facile et rapide que le programme initial. Il suffit de reprendre le programme initial, de le renommer (programme alternatif), d'enlever les sous-programmes des unités de travail non nécessaires (ST5 et le transporteur central) et d'ajouter celui de ST3.

Réutilisation des programmes

La notion de réutilisation est fortement utilisée dans ces deux programmes, ce qui permet de sauver beaucoup de temps lors de leurs conceptions et réalisations. En fait, la majorité des sous-programmes sont des répliques de ceux utilisés dans le *programme test*, à l'exception de ceux des postes de travail, du poste d'entrée et du programme principal. Cependant, quelques changements mineurs sont nécessaires pour assurer la communication entre les sous-programmes. Ces changements se limitent au remplacement des numéros d'étapes permettant d'activer ou de désactiver un sous-programme.

Sous-programmes des postes de travail

Les sous-programmes des postes de travail sont basés sur un programme type conçu et testé sur le poste de travail P1 pour qu'il soit réutilisable pour tous les autres postes. Les GRAFCET niveaux 1 et 2 de ce programme type sont présentés aux figures 6.13 et 6.14.

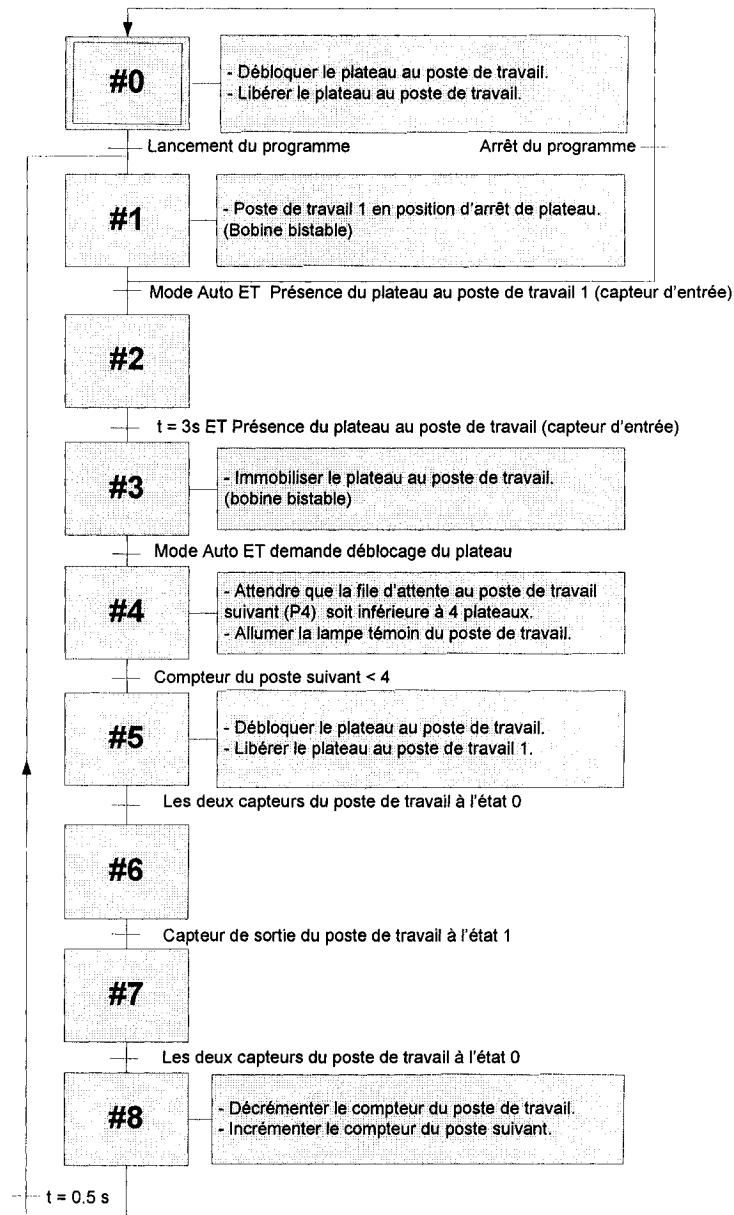


Figure 6. 12. GRAFCET niveau 1 du programme type de commande d'un poste de travail en mode semi-automatique.

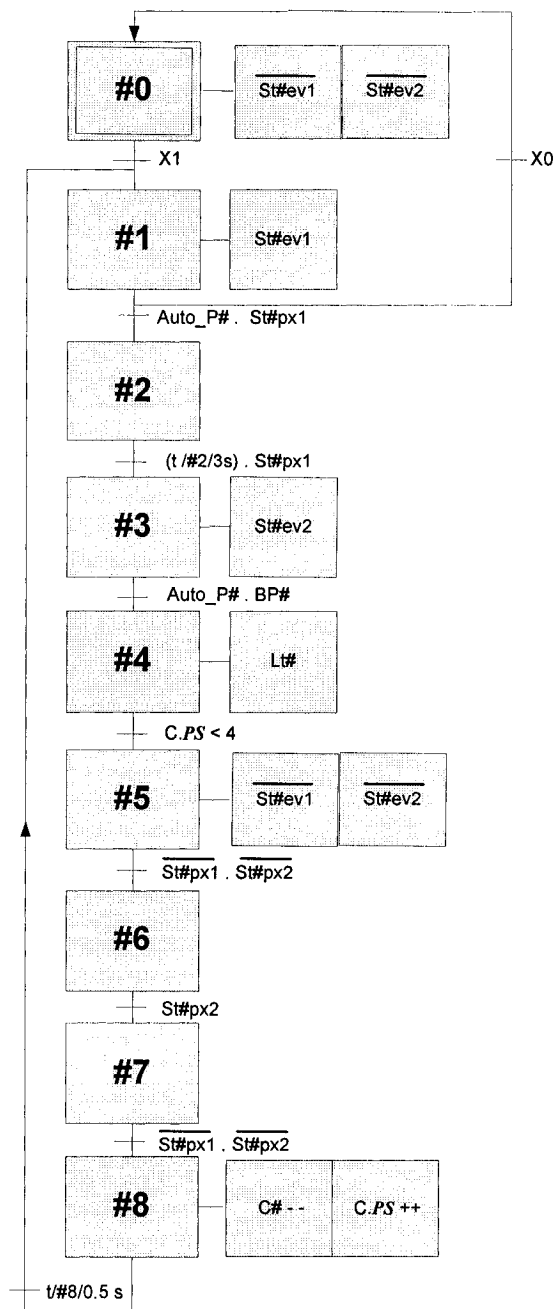


Figure 6. 13. GRAFCET niveau 2 du programme type de commande d'un poste de travail en mode semi-automatique.

Pour adapter ces GRAFCET du programme type à n'importe quel poste de travail, il suffit de remplacer les # par le numéro du poste en question et le *PS* par le numéro du poste situé à son aval dans la gamme de production.

6.5.2 - Gamme avec retours en arrière (P1 – P4 – P3)

Ce programme est composé des mêmes types de sous-programmes que la gamme sans retour en arrière, avec l'ajout d'une autre catégorie (*programmes de transfert*) qui consiste à établir un sous-programme pour chaque opération de transfert entre deux postes de travail ou entre un poste de travail et la sortie du système. Ainsi, les programmes suivants sont utilisés:

- trois sous-programmes destinés à commander séparément chacun des postes de travail utilisés dans cette gamme de production : P1, P4 et P3;
- un sous-programme destiné à la commande du poste d'entrée;
- sept sous-programmes destinés à commander séparément chacune des stations de transfert : ST1, ST2, ST3, ST5, ST6, ST7 et ST8;
- un sous-programme pour la commande du transporteur central;
- un sous-programme pour la commande du transporteur principal et celui de l'entrée;
- trois sous-programmes de transfert : de P1 vers P4, de P4 vers P3 et de P3 vers la sortie du système. Vue que l'exécution simultanée de deux programmes de transfert génère des problèmes de blocage, les programmes de commande de cette gamme doit faire en sorte d'éviter de telles situations. Ceci est réalisé grâce au système de gestion des files d'attente qui s'exécute au niveau des sous-programmes des postes de travail (voir le paragraphe ci-dessous : *évaluation des conditions de libération des plateaux*);
- un programme principal, permettant de gérer le démarrage et l'arrêt du système.

Réutilisation des programmes

De la même manière que les programmes de la gamme sans retour en arrière, plusieurs sous-programmes sont réutilisés. Ceux des stations de transfert et des transporteurs sont

des répliques de ceux utilisés dans le programme test. Les sous-programmes des postes de travail utilisent le programme type présenté dans la sous-section 6.5.1, avec la différence suivante : la transition entre les étapes #4 et #5 doit être refaite pour chacun des postes de travail (P1, P4 et P3) afin d'exécuter l'ensemble de tests relatifs à la gestion des files d'attente pour éviter les situations de blocage. En fait, c'est au niveau de cette transition que le poste de travail décide de la libération de son plateau. La programmation de ces transitions est présentée dans le paragraphe suivant :

Évaluation des conditions de libération des plateaux

Les transitions entre les étapes #4 et #5 des GRAFCET de commande des postes de travail permettent la libération des plateaux et le lancement des sous-programme de transfert correspondants. Ces transitions doivent être programmées de façon à éviter les situations de blocage, tout en optimisant le plus possible le temps des plateaux dans le système. Cette programmation est basée sur la méthode de gestion des files d'attente et des temps d'opération présentée antérieurement, à la figure 6.9.

Conditions de libération de plateaux pour le poste P1 :

Il ne faut pas que P1 libère un plateau au même temps que P4. Les tests exécutés, avant d'effectuer une opération de libération, sont présentés en résumé sous forme d'un *pseudo langage* :

Avec: Cx.V => valeur du compteur de la file d'attente du poste de travail x.

IF

**[(C4.V < 4 AND C4.V < C3.V) OR (C4.V = C3.V AND C4.V < C1.V) OR
(C4.V = C1.V AND C4.V = C3.V)] AND [Demande de libération au poste P4] OR
[C4.V < 4 AND (Pas de demande de libération au poste P4)]**

AND (pas de programme de transfert en cours)

THEN Autoriser la libération du plateau au poste P1

Condition de libération de plateaux pour le poste P4 :

De la même manière que P1, le poste P4 doit effectuer un ensemble de tests présentés dans le *pseudo langage* suivant :

IF

[(C3.V < 4 AND C4.V > C3.V) OR (C4.V = C3.V AND C4.V > C1.V)] AND

[Demande de libération au poste P1] OR

[C3.V < 4 AND (Pas de demande de libération au poste P1)]

AND (pas de programme de transfert en cours)

THEN Autoriser la libération du plateau au poste P4

Condition de libération de plateaux pour le poste P3 :

Vu que le poste de travail P3 a la priorité pour libérer ses plateaux vers la sortie du système, sa condition de libération de plateaux se limite au fait qu'aucun des deux autres programmes de transferts (de P1 vers P4 ou de P4 vers P3) ne soit en exécution.

Programmes de transfert

Les trois programmes de transfert utilisés sont présentés au tableau 6.4, et leurs GRAFCET niveau 1 sont présentés aux figures 6.15, 6.16 et 6.17.

Tableau 6. 4. Programmes de transfert utilisés pour la gamme P1 – P4 – P3

Programme de transfert	Source de l'autorisation d'exécution	Conditions d'autorisation
Transfert de P1 vers P4	Poste de travail P1	P1 autorisé à effectuer une libération
Transfert de P4 vers P3	Poste de travail P4	P4 autorisé à effectuer une libération
Transfert de P3 vers la sortie	Poste de travail P3	Aucun autre transfert n'est en cours

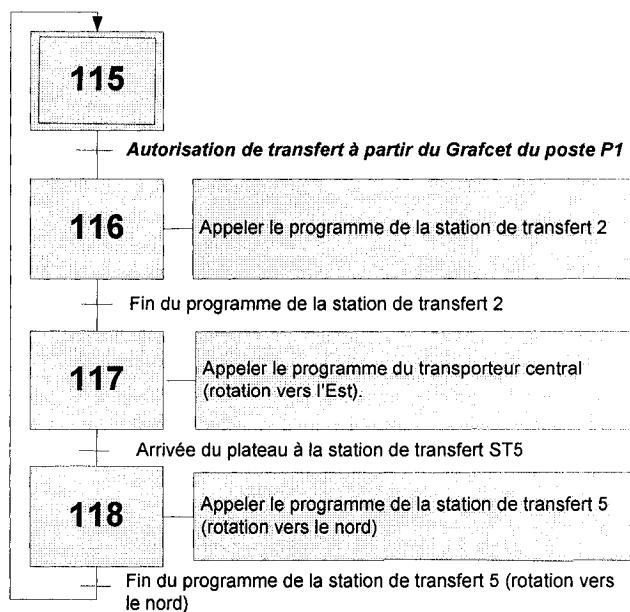


Figure 6. 14. GRAFCET niveau 1 du programme de transfert de P1 vers P4

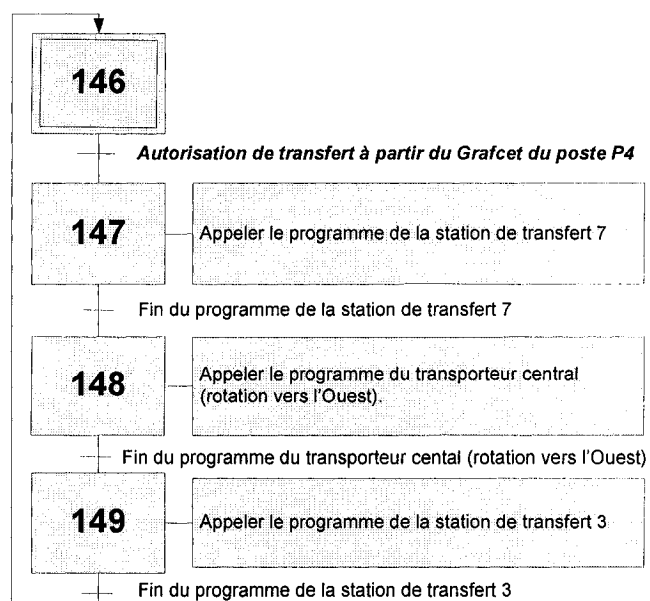


Figure 6. 15. GRAFCET niveau 1 du programme de transfert de P4 vers P3

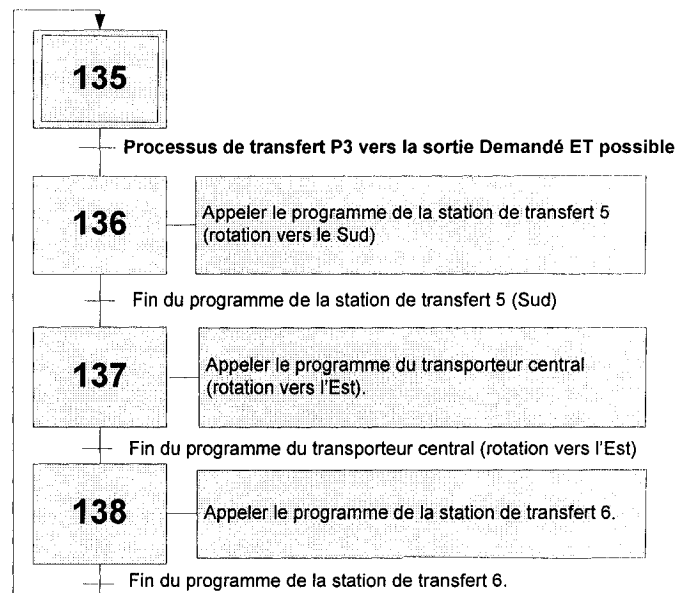


Figure 6. 16. GRAFCET niveau 1 du programme de transfert de P3 vers la sortie

Comme illustré sur les GRAFCET des figures 6.15, 6.16 et 6.17, chacun des programmes de transfert fait appel au transporteur central et à une ou plusieurs stations de transfert, et reçoit l'autorisation d'exécution d'autres sous-programmes des postes de travail. L'ensemble de ces communications est présenté à la figure 6.18. Les sens des flèches de cette figure indiquent la provenance et la destination de l'ordre d'exécution des sous-programmes.

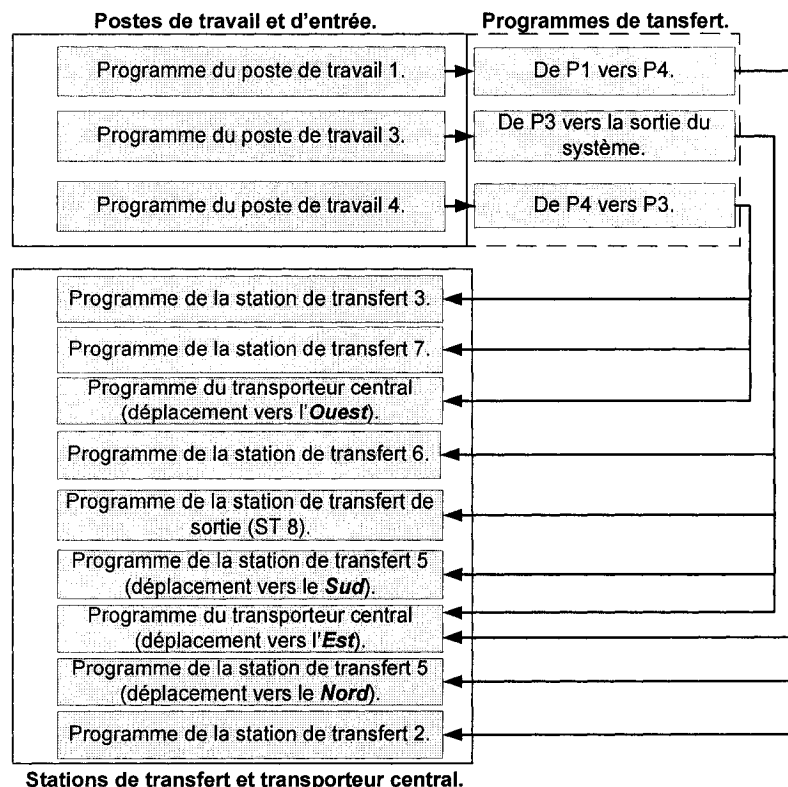


Figure 6. 17. Communication entre les programmes de transfert et les autres entités du système

6.5.3 - Gamme à utilisation multiple d'un poste de travail P1- P4 - P3 - P4 -P5

Le programme de commande de cette gamme de production réutilise plusieurs sous-programmes de la gamme P1 - P4 - P3, réalisés précédemment. La seule grande différence consiste à introduire le programme d'orientation des plateaux quittant le poste P4 (voir figure 6.19), et d'assurer la communication de celui-ci avec les sous-programmes de transfert de P4 vers P3 et de P4 vers P5. Ainsi, le programme de cette gamme est composé de l'ensemble suivant :

- quatre sous-programmes destinés à commander séparément chacun des postes de travail (P1, P3, P4 et P5). Le sous-programme de P5 est conçu en utilisant le programme type d'un poste de travail présenté à la sous-section 6.5.1;
- un sous-programme destiné à la commande du poste d'entrée;

- six sous-programmes destinés à commander séparément chacune des stations de transfert : ST1, ST2, ST3, ST5, ST7 et ST8;
- un sous-programme pour la commande du transporteur central;
- un sous-programme pour la commande des transporteurs principal et d'entrée;
- trois sous-programmes de transfert : de P1 vers P4, de P4 vers P3 et de P4 vers P5;
- un programme principal, permettant de gérer le démarrage et l'arrêt du système.

Le sous-programme de transfert de P4 vers P3 s'exécute lorsque le plateau quittant le poste P4 est en provenance de P1 (bit M1_P1=1), alors que celui de P4 vers P5 s'exécute si le plateau libéré est en provenance de P3 (bit M1_P3=1). Ces deux sous-programmes ne peuvent pas s'exécuter simultanément, car M1_P1 est toujours différent de M1_P3 (voir la sous-section 3.4.5 du chapitre 3).

La gestion de destination des plateaux quittant le poste P4 consiste à décider de leurs prochains postes de travail en fonction de leurs postes de provenance. Le programme de commande est basé sur la méthode présentée à la sous-section 3.4.5 du chapitre 3. La logique de fonctionnement du programme concernant l'orientation des plateaux à partir du poste P4 est présentée dans l'organigramme illustré à la figure 6.19.

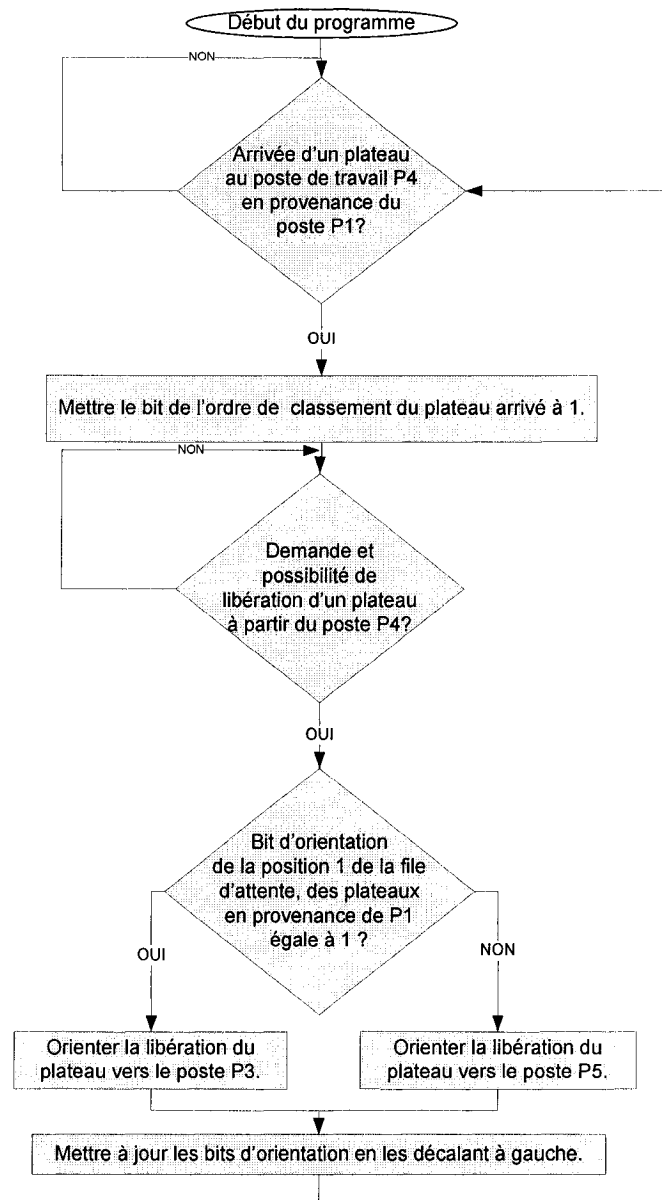


Figure 6. 18. Organigramme de gestion de destination des plateaux à partir du poste P4

6.5.4 - Systèmes de supervision en mode semi-automatique

Le système de supervision (figure 6.20) permet d'informer l'utilisateur, en temps réel, sur l'état du *ST*, pendant le fonctionnement en mode semi-automatique. Il permet l'affichage des informations suivantes :

a - Informations concernant le déroulement fonctionnel du ST

- afficher un message indiquant que le programme de commande est en cours d'exécution;
- afficher la localisation de tous les plateaux existant dans le ST;
- afficher l'état des transporteurs et le sens de déplacement, dans le cas du transporteur central;
- afficher l'état de chacune des stations de transfert;
- afficher un message d'alarme, en cas de saturation de la sortie ST.

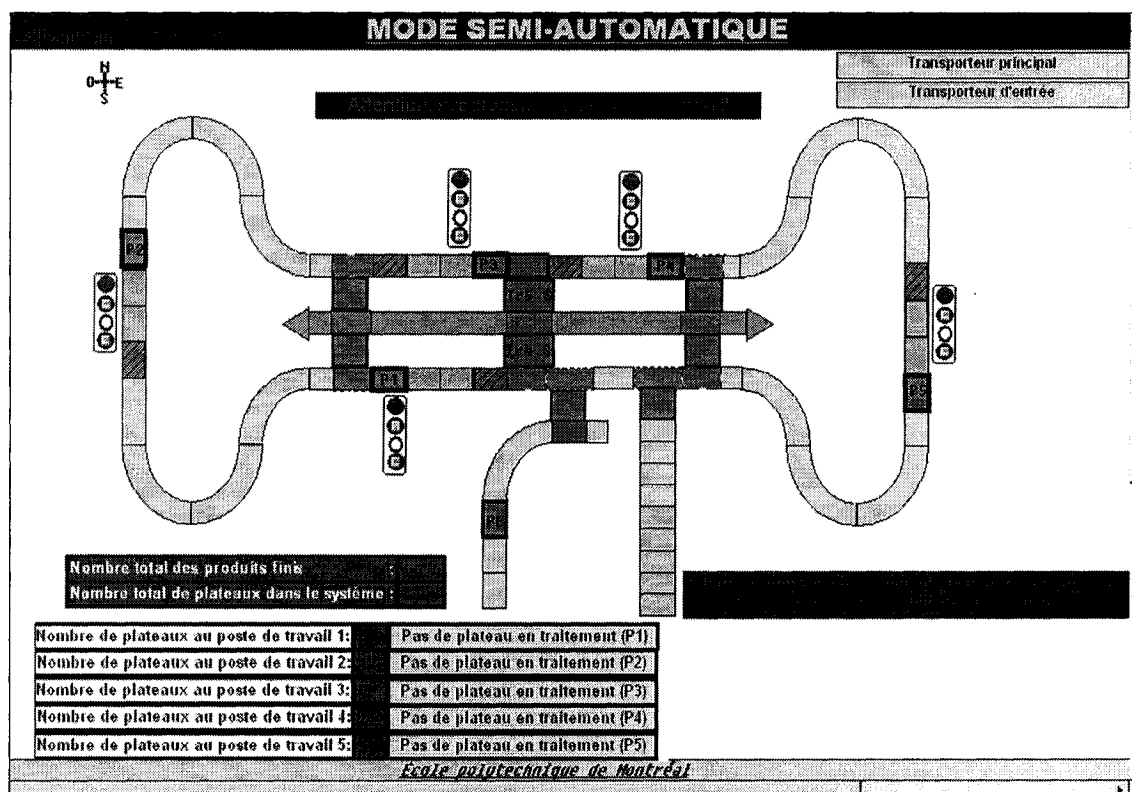


Figure 6. 19. Écran de supervision

b - Informations quantitatives, concernant les produits en traitement

En plus des informations relatives au déroulement fonctionnel du ST, le système de supervision offre des informations d'ordre productique :

- nombre total de produits dans le ST;

- nombre total de produits finis, depuis le démarrage d'exécution du programme de commande;
- file d'attente pour chacun des postes de travail;
- l'état de chacun des postes de travail, en affichant s'il s'y trouve un plateau en traitement ou non.

Ces données permettent d'avoir des informations utilisables pour évaluer le nombre des produits finis et en cours, permettant ainsi l'analyse de la productivité et de l'efficacité du *ST*, afin d'améliorer et rentabiliser au maximum son utilisation.

6.5.5 - Conception du programme d'une nouvelle gamme de production

Pour concevoir le programme de n'importe quelle nouvelle gamme de production, il est possible de bénéficier de la réutilisation des programmes conçus pour les gammes précédentes (P1 – P4 – P5, P1 – P4 – P3 et P1 – P4 – P3 – P4 – P5). En fait, tous les sous-programmes de ces trois gammes de production peuvent, dans les cas échéants, être réutilisés pour la réalisation de nouveaux programmes. Ceci facilite les tâches de conception et de programmation, permettant de gagner beaucoup de temps à ce niveau.

6.6 - Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons présenté des exemples d'applications réalisées à l'atelier test du projet. Ces applications couvrent les principaux aspects d'amélioration de la flexibilité et de la robustesse des *ST* présentés dans le chapitre 3 de ce mémoire. Les exemples utilisés ont mis en évidence la possibilité de localiser et de contourner des situations de blocage en se basant sur des méthodes et des programmes relativement simples à concevoir et à réaliser. La gestion de destination des produits, dans le cas d'utilisation multiple de postes de travail, dans la même gamme de production, est aussi vérifiée avec une gamme de production à faible niveau de complexité qui démontre l'efficacité de la méthode proposée pour ce genre de problème.

Durant la réalisation des différents programmes du mode semi-automatique, les notions de décomposition logique du *ST* et de réutilisation des programmes ont été mises en application. Ceci a permis de faciliter la conception des programmes de commande et de raccourcir considérablement leurs temps de conception et de réalisation.

CHAPITRE 7 - MODE MANUEL

7.1 - Introduction

Pour améliorer la robustesse d'un *ST*, il est nécessaire de faire en sorte que celui-ci puisse fonctionner d'une manière partielle lors d'éventuelles anomalies. Ce chapitre présente un mode de fonctionnement, dit *mode manuel* (initié à la sous-section 3.3.3), servant d'alternative pratique en cas de dysfonctionnement du *ST*. En fait, c'est un mode de fonctionnement dégradé utilisé dans le cas où le *ST* rencontre des difficultés relatives aux *unités de travail* destinées au contournement des postes de travail.

Contrairement au mode semi-automatique, le mode manuel offre la possibilité de la production multiproduit en permettant la présence simultanée dans le *ST* de produits à différentes gammes de production. Cet avantage est rendu possible grâce au fait que la vérification des gammes de production se fait d'une façon manuelle par les opérateurs du *ST* à chacun des postes de travail. Par conséquent, un plateau doit nécessairement passer par chacun de ces postes, sans qu'aucun ne soit contourné, pour subir une vérification manuelle de sa gamme de production.

Les contraintes de fonctionnement du mode manuel sont présentées à la deuxième section de ce chapitre, suivies d'une présentation des phases de manutention des plateaux (section 7.3). La quatrième et la cinquième section présentent respectivement le programme de commande et le système de supervision du mode manuel.

7.2 - Phases de manutention des plateaux

Cette section présente les trois principales phases de manutention des plateaux, durant le fonctionnement du système en mode manuel soit l'introduction dans le *ST*, la trajectoire et l'opération d'évacuation.

7.2.1 - Entrée des plateaux dans le ST

À la présence d'un plateau au poste d'entrée, celui-ci est libéré, aussitôt que la file d'attente du poste de travail 1 est inférieure à 4 et la station de transfert ST1 est disponible. Sinon, le plateau reste immobilisé jusqu'à ce que ces conditions soient satisfaites.

7.2.2 - Trajectoire suivie par les plateaux

Chacun des plateaux emprunte le transporteur principal pour passer d'un poste source à un autre de destination. Toutefois, le plateau doit être arrêté aux postes intermédiaires pour vérifier la disponibilité du poste de travail en aval (vérification effectuée par le programme de commande). Si la file d'attente du poste suivant est inférieure à 4, le plateau va être libéré, sinon, il doit attendre jusqu'à que cette condition soit vraie. Si un plateau doit être traité à un poste de travail quelconque, l'opérateur doit exprimer cette intention en appuyant sur le bouton poussoir situé sur la boîte de commande du poste de travail en question, juste avant l'arrivée du plateau à ce dernier. Ainsi, le plateau va être immobilisé aussitôt que celui-ci se positionne au poste de travail, et il peut être libéré à la fin de son traitement en réactionnant le même bouton poussoir. De même, cette libération est conditionnée par une file d'attente inférieure à 4 plateaux au poste suivant. Dans cette proposition, aucun contournement des cinq postes de travail n'est utilisé. Ainsi, le transporteur central et les stations de transfert ST2 à ST7 ne sont pas utilisés. La trajectoire suivie par les plateaux en mode manuel est illustrée à la figure 7.1.

Les boutons poussoirs d'immobilisation des plateaux aux cinq postes de travail sont nommés : Bp1 à Bp5. À chaque fois qu'un bouton poussoir est actionné par l'opérateur, dans l'objectif d'immobiliser un plateau, un voyant lumineux de couleur verte s'allume, dans la boîte de commande du poste en question, pour indiquer que l'opération est bien prise en considération. Ce voyant s'éteint dès que le plateau en question est immobilisé au poste de travail correspondant.

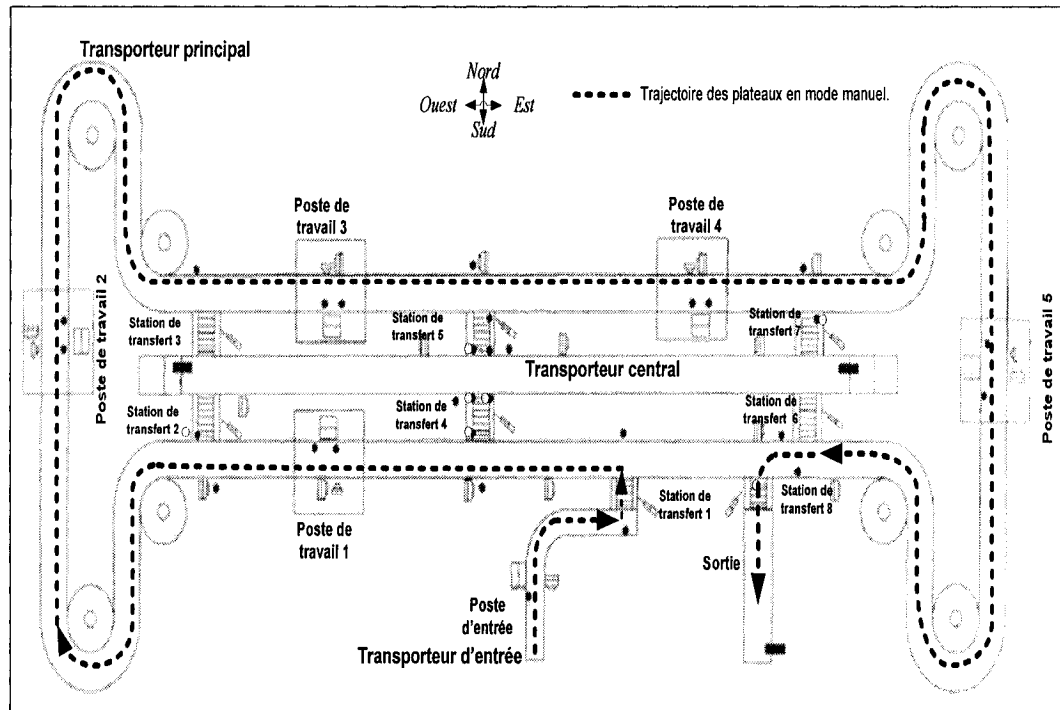


Figure 7. 1. Trajectoire suivie par les plateaux en mode manuel

7.2.3 - Évacuation des plateaux du ST

L'évacuation d'un plateau du ST, en mode manuel, se fait juste après son passage par le poste de travail 5. Ainsi, si la gamme de production d'un plateau nécessite le passage dans un autre poste de travail après le 5^e poste, celui-ci doit être évacué et réintroduit à nouveau dans le ST pour réaliser les autres opérations. L'exemple suivant présente ce genre de situation.

Exemple: pour la gamme de production : P1 - P2 - P5 - P3 - P4, Le plateau suit les étapes ci-dessous :

- introduction du plateau au ST;
- exécution des tâches P1 - P2 - P5 sur le plateau;
- évacuation du plateau du ST;
- réintroduction du plateau au ST;
- exécution des tâches P3 - P4 sur le plateau;
- évacuation finale du plateau du ST.

7.3 - Commande du *ST* en mode manuel

Le programme de commande en mode manuel est réalisé en mettant en pratique la notion de la *décomposition logique* présentée à la sous-section 3.3.2. En fait, plusieurs *unités de travail* (voir la sous-section 3.3.1) auront chacune son propre programme de commande :

- postes de travail P1, P2, P3, P4 et P5 : chaque poste de travail a son propre programme de commande;
- poste d'entrée;
- station de transfert d'entrée (ST1);
- station de transfert de sortie (ST8);
- transporteur principal et transporteur d'entrée.

Avant de procéder à la présentation des programmes de commande, il est nécessaire de citer les principales contraintes de fonctionnement.

7.3.1 - Contraintes du fonctionnement en mode manuel

Le fonctionnement en mode manuel est limité par les contraintes suivantes :

- si un poste de travail contient 4 plateaux, incluant celui en traitement, il ne doit plus en recevoir, jusqu'au moment que sa file devienne inférieure à 4;
- le poste d'entrée ne peut libérer un plateau, qui s'y trouve, que lorsque la station de transfert d'entrée (ST1), permettant d'amener les plateaux vers le transporteur principal, est disponible. Cela permet d'éviter que le plateau arrive à cette station, alors qu'elle est en train de transférer un autre plateau;
- le 5^e poste de travail ne peut libérer un plateau qui s'y trouve que lorsque la station de transfert de sortie (ST8) est disponible. Ceci permet d'éviter que le plateau arrive à cette station, alors qu'elle est en train de transférer un autre plateau;
- la station ST8 ne peut évacuer un plateau que si la sortie du système est disponible (non saturée). Cette vérification est effectuée grâce au détecteur de plateaux, positionné au fond de la sortie, celui-ci est actionné aussitôt que la sortie du *ST* ne peut plus recevoir de plateaux. Ainsi, cette information est transférée à la station ST8

pour éviter que celle-ci ne transfère des plateaux, ce qui causera un débordement dans la sortie du système.

7.3.2 - Programmes de commande en mode manuel

Le programme de commande du système en mode manuel est composé d'un programme principal et 9 sous-programmes (GRAFCET auxiliaires) permettant la commande séparée de chacune des unités de travail présentées au début de la section 7.3. Ces programmes et leurs objectifs sont les suivants:

- un programme principal permet le démarrage et l'arrêt de fonctionnement du *ST* en mode manuel;
- cinq sous-programmes des postes de travail permettent la commande des opérations qui se font au niveau de chacun des postes de travail;
- un sous-programme dédié au poste d'entrée permet la commande des opérations d'accès des plateaux au *ST*;
- un sous-programme des transporteurs principal et d'entrée permet la mise en œuvre ou l'arrêt simultané de ces deux transporteurs;
- un sous-programme de la station de transfert d'entrée (ST1) commande les opérations d'acheminement des plateaux vers le transporteur principal à partir de celui de l'entrée;
- un sous-programme de la station de transfert de sortie commande les opérations d'évacuation des plateaux.

Le sous-programme du poste d'entrée communique avec celui de la station de transfert ST1 et avec le programme du poste de travail 1, qui recevra le plateau libéré par le poste d'entrée. Ces communications sont basées sur la vérification de la longueur de la file d'attente au poste de travail 1 et la disponibilité de ST1 (voir la sous-section 7.3.4).

7.3.3 - Communication entre les programmes du mode manuel

Pour assurer une synchronisation entre les opérations et un bon fonctionnement du *ST*, plusieurs sous-programmes communiquent entre eux. La figure 7.2 présente un diagramme illustrant ces communications.

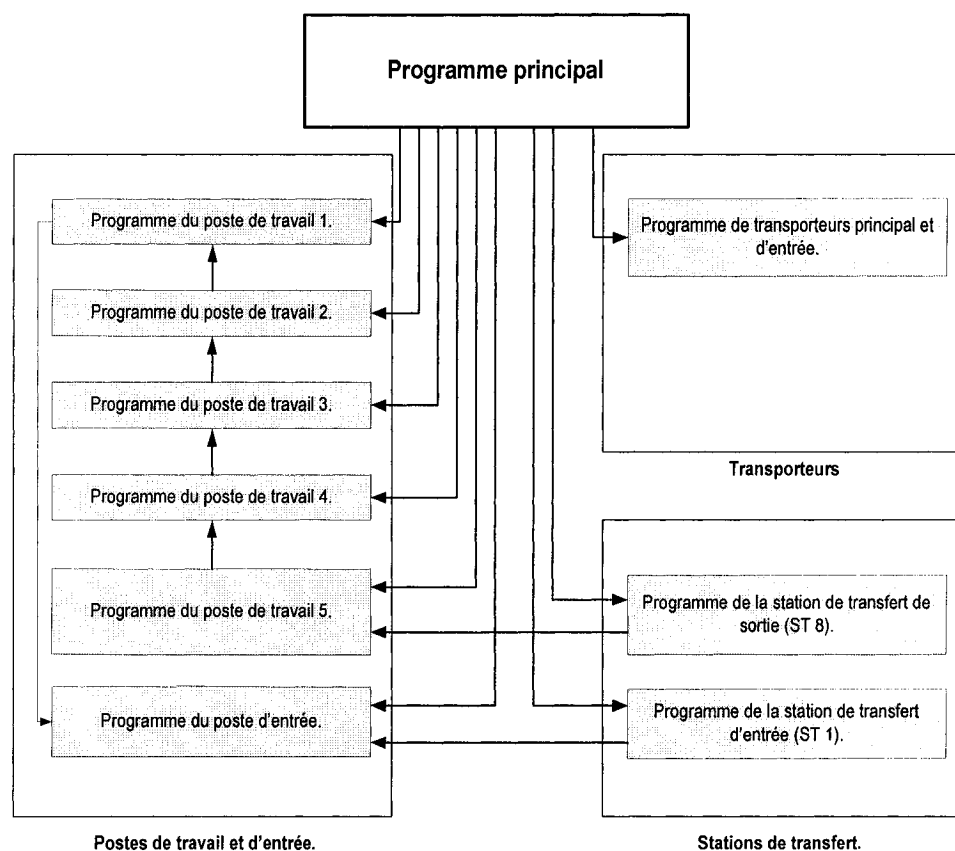


Figure 7. 2. Communications entre les programmes du mode manuel

Le sens des flèches, dans la figure 7.2, indique le sens de circulation de l'information entre les différents programmes, pendant le processus d'exécution :

- les liens entre le programme principal et les autres sous-programmes représentent le passage de l'état d'attente à l'état actif, ou l'inverse, pour chacun de ces sous-programmes;

- le lien entre les programmes de chaque paire de postes de travail représente l'information qu'un poste en amont reçoit de celui situé à son aval, concernant sa file d'attente;
- le lien entre le programme du poste de travail 1 et celui du poste d'entrée représente l'information que ce dernier reçoit concernant l'état de la file d'attente du poste 1;
- le lien entre le programme de la station de transfert d'entrée et celui du poste d'entrée représente l'information que celui-ci reçoit, concernant la disponibilité de la station, pour vérifier la possibilité de libérer son plateau;
- le lien entre le programme de la station de transfert de sortie et celui du poste de travail 5, représente l'information que celui-ci reçoit, concernant la disponibilité de la station de transfert pour qu'il puisse libérer son plateau.

7.3.4 - Sous-programmes du poste d'entrée

Le poste d'entrée permet le transfert d'un plateau à partir de l'entrée du système vers la station de transfert ST1, qui permet à son tour de le transférer vers le transporteur principal. Bien que les conditions de libération d'un plateau présent au poste d'entrée se résument à la disponibilité de la station ST1 et une file d'attente au poste 1 inférieure à 4 plateaux, le cas exceptionnel de présence simultanée de plus d'un plateau au poste d'entrée reste à clarifier : si deux plateaux, ou plus, sont introduits au *ST*, le poste d'entrée procède ainsi :

- 1) attendre que les conditions de libération, du premier plateau, soient satisfaites;
- 2) libérer le premier plateau;
- 3) procéder à une temporisation d'attente, dont la valeur varie selon la vitesse du transporteur, pour s'assurer que le premier plateau s'est rendu à la station ST1;
- 4) vérifier les conditions de libération du deuxième plateau;
- 5) répéter les étapes de 1 à 4.

La troisième opération du processus ci-dessus est nécessaire pour éviter que deux plateaux soient au même temps à la station de transfert 1, ce qui cause un débordement à

cette station et peut générer, par conséquent, un blocage ou une surcharge du convoyeur de la station ST1. L'exemple suivant illustre ce type de problème : soit deux plateaux *PL1* et *PL2* qui sont introduits simultanément à l'entrée du système, avec *PL1* en amont de *PL2*. En absence de temporisation d'attente (étape 3), les événements se présenteront comme suit :

- le plateau *PL1* arrive au poste d'entrée, avec le *PL2* qui le colle en aval;
- *PL1* se libère, quand ses conditions de libération sont satisfaites (file d'attente du poste de travail $1 < 4$ & ST1 disponible);
- aussitôt que *PL1* est libéré, *PL2* se présente au poste d'entrée et celui-ci procède à la vérification de la file d'attente du poste 1 et la disponibilité de ST1. Pendant ce temps, le plateau *PL1* n'est pas encore rendu à la station ST1 (ce qui signifie que ST1 est disponible). Si la file d'attente au poste de travail 1 est toujours inférieure à 4, cela signifie que *PL2* sera libéré avant même que *PL1* arrive à ST1. Dans cette situation, le débordement de la station de transfert 1 (ST1) est inévitable.

Le GRAFCET niveau 1 du programme du poste d'entrée (figure 7.3) illustre la logique de fonctionnement de celui-ci.

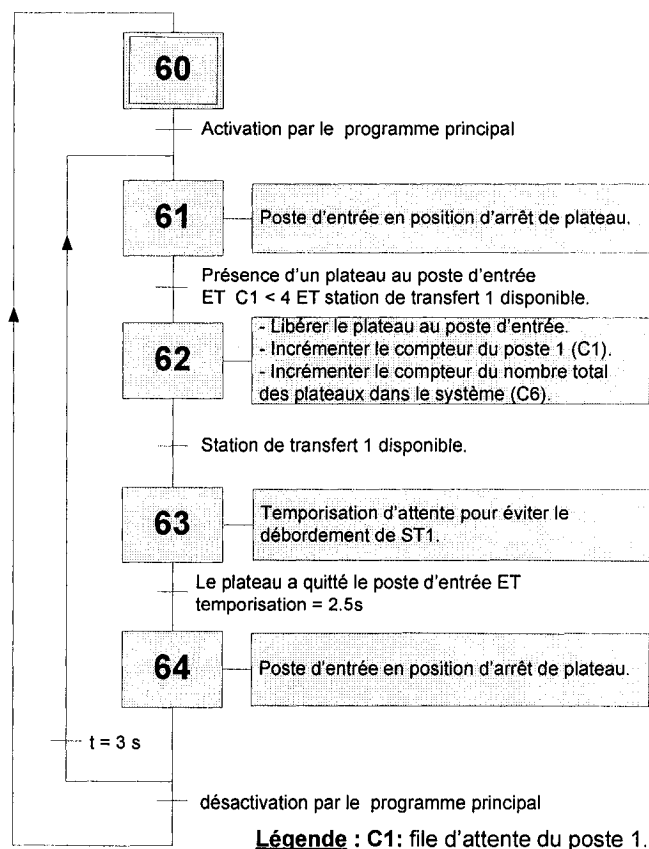


Figure 7. 3. GRAFCET niveau 1 du programme du poste d'entrée

7.3.5 - Sous-programmes des postes de travail

Les programmes de commande des postes de travail en mode manuel sont basés sur un programme type réutilisé pour chacun des postes. La conception de ce programme est basée sur les étapes suivantes :

- concevoir un programme pour le poste de travail 1, à titre d'essai;
- faire les essais et les ajustements nécessaires;
- valider le programme;
- enregistrer le programme dans un fichier dédié aux programmes et sous-programmes validés.

Après la validation du programme type, sa réutilisation devient possible pour les quatre autres postes, et aussi dans le cas d'ajout d'autres postes de travail au *ST*. Cependant, sa réutilisation nécessite certaines modifications propres à chacun des postes :

- changer les numéros des étapes des GRAFCET pour chaque nouveau programme;
- changer les références des capteurs et actionneurs par celles du nouveau poste.

La figure 7.4 présente le GRAFCET niveau 1 du programme type d'un poste de travail en mode manuel, composé de deux GRAFCET. La commande des opérations principales du poste de travail est effectuée avec un programme *principal* (figure 7.4, étapes : de 10 à 19 & 185 et 186) tandis qu'un programme secondaire (figure 7.4, étapes : de 210 à 213) s'occupe de la commande et la gestion des demandes d'immobilisation et de libération d'un plateau au poste de travail. La communication entre ces deux programmes s'effectue comme suit :

- l'étape 14 du programme principal du poste de travail valide la transition située entre les étapes 211 et 212 du programme secondaire;
- l'étape 18 du programme principal du poste de travail valide la transition situé entre les étapes 213 et 210 du programme secondaire;
- l'étape 210 du programme secondaire fait partie des conditions de validation de la transition située entre les étapes 11 et 185 du programme principal du poste de travail;
- l'étape 211 du programme secondaire fait partie des conditions de validation de la transition située entre les étapes 11 et 12 du programme principal du poste de travail.

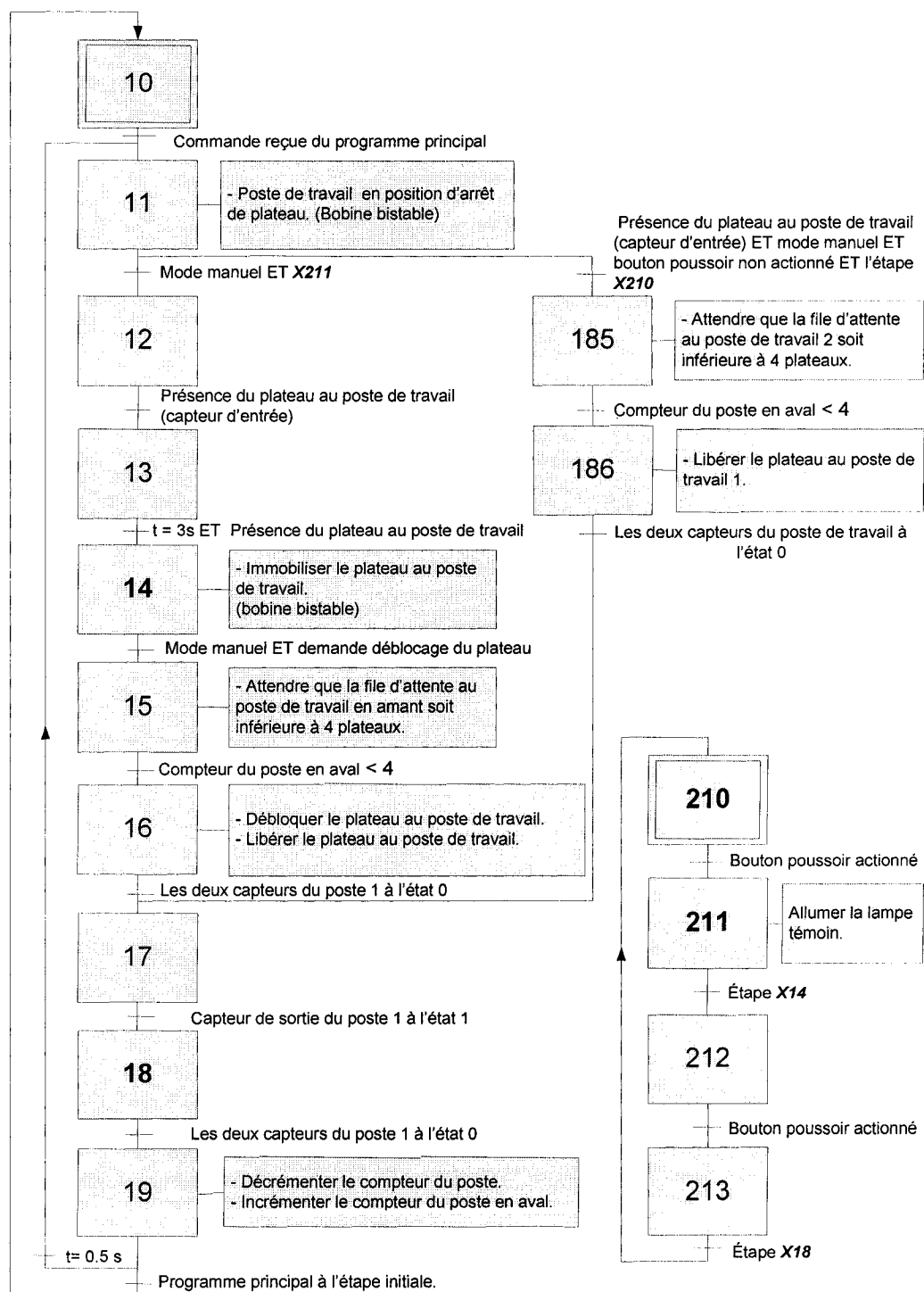


Figure 7. 4. GRAFCET niveau 1 du programme type d'un poste de travail en mode manuel

7.3.6 - Sous-programmes des stations de transfert

Les programmes des stations de transfert utilisées en mode manuel (ST1 et ST8) sont basés sur un programme type, conçu et validé de la même manière que celui des postes de travail. Cependant, certains ajouts sont nécessaires pour la station ST8 par rapport à ST1. Ces ajouts sont sous formes d'actions et sont écrits en italique dans la figure 7.5 qui présente le GRAFCET niveau 1 du programme type des stations de transfert.

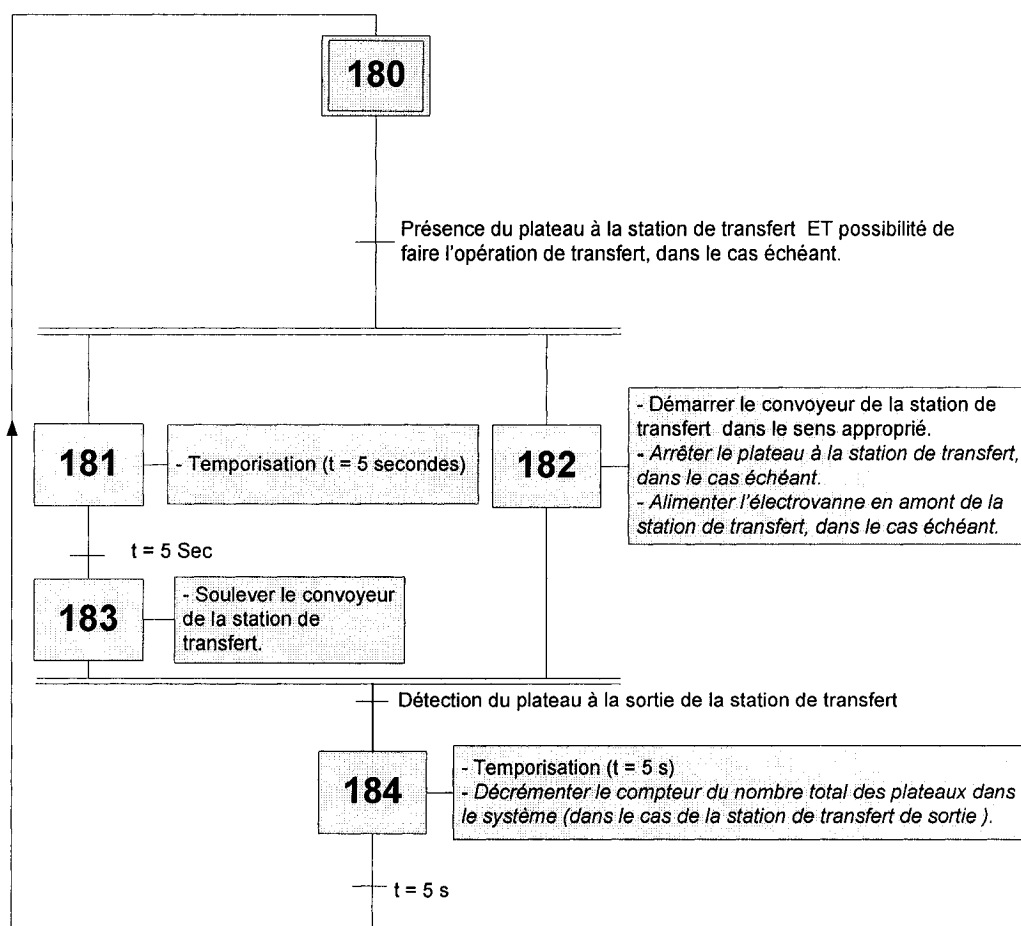


Figure 7. 5. GRAFCET niveau 1 du programme type en mode manuel d'une station de transfert

7.3.7 - Sous-programmes des transporteurs principal et d'entrée

Le transporteur principal et celui de l'entrée sont actionnés et désactivés simultanément par le programme principal de commande du ST. Ainsi, ces deux transporteurs restent en fonctionnement jusqu'à l'arrêt du système.

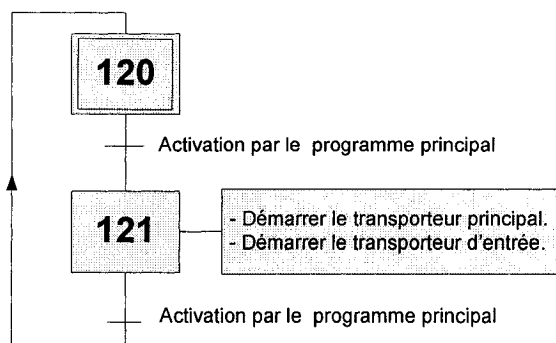


Figure 7. 6. GRAFCET niveau 1 du programme des transporteurs principal et d'entrée

7.4 - Système de supervision du mode manuel

Le système de supervision permet d'informer l'utilisateur sur l'état du *ST*, en temps réel, pendant le fonctionnement du *ST* en mode manuel. Ce système permet d'afficher sur l'écran de l'ordinateur de contrôle des informations concernant l'état des différents capteurs et actionneurs pendant l'exécution des programmes de commande. En outre, il donne des informations quantitatives, concernant les produits en traitement.

7.4.1 - Informations concernant l'état du *ST*

Cette catégorie d'informations est présentée ci-dessous :

- un message indiquant que le programme de commande est en cours d'exécution;
- la localisation de tous les plateaux existants dans le *ST* est affichée sous forme d'un rectangle coloré en vert, orange ou marron, selon son ordre dans la file d'attente;
- l'état du transporteur principal et celui de l'entrée : pendant le fonctionnement d'un de ces deux transporteurs, un rectangle libellé par son nom clignote en couleur verte;
- les états des stations de transfert d'entrée et de sortie : si l'une de ces stations est en train d'exécuter une tâche, son rectangle correspondant clignote en couleur marron et sa référence s'affiche en couleur verte;
- un message demande de vider la sortie du *ST*, dans le cas de sa saturation.

7.4.2 - Informations quantitatives concernant les produits en traitement

Les informations quantitatives affichées par le système de supervision sont les mêmes que celles présentées en mode semi-automatique, à la sous-section 6.5.4 - b. La figure 7.7 donne un exemple illustrant l'affichage de ces informations pendant que le programme du mode manuel est en exécution.

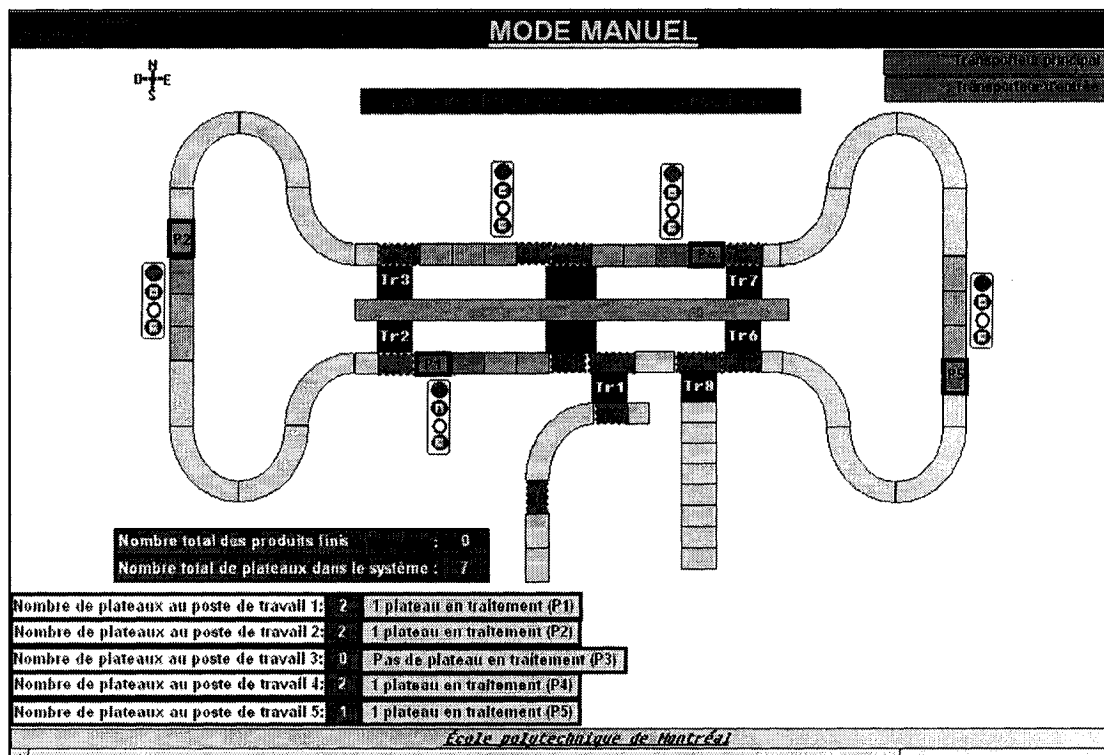


Figure 7. 7. Écran de supervision affichant les informations des files d'attente

7.5 - Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons pu tester avec succès la capacité du mode manuel à faire fonctionner le *ST* sans que celui-ci ne fasse recours aux *unités de travail* dédiées au contournement des postes de travail. En fait, le mode manuel permet d'améliorer la robustesse d'un *ST* en permettant son fonctionnement malgré qu'il subisse des dysfonctionnements majeurs au niveau des systèmes de contournement des postes de travail.

Ce mode de fonctionnement améliore aussi la flexibilité du *ST*, en offrant la possibilité de l'utiliser dans un contexte de production multiproduit. Ceci est important dans le cas où le *ST* ne peut pas être utilisé en mode automatique, dédié principalement à ce type de production, à cause de l'absence ou de dysfonctionnement du système de reconnaissance des produits, basé sur des étiquettes électroniques. Cet avantage est offert grâce au fait que chacun des produits passe par tous les postes de travail, pour subir une vérification manuelle de sa gamme de production. Par la suite, à chaque fois qu'un produit passe par un poste de travail qui figure dans sa gamme, il va y être arrêté pour subir le traitement nécessaire.

CHAPITRE 8 - CONCLUSION

Le but de ce projet était de proposer des méthodes permettant d'améliorer la flexibilité et la robustesse des *ST*. Trois méthodes sont proposées. En premier, l'amélioration de la flexibilité en se basant sur des stratégies de décomposition physique et logique des systèmes, tout en appliquant la notion de réutilisation des programmes de commande. En second lieu, l'amélioration de la robustesse est basée sur des méthodes de contournement des situations de blocage, en utilisant une méthode de gestion des files d'attentes des postes de travail. En troisième, pour des gammes de production à utilisation multiple de postes de travail, ce projet propose une méthode de gestion d'orientation des produits aux postes utilisés à plusieurs reprises en utilisant des adresses internes de la mémoire de l'*API*.

En outre, le présent projet propose différents modes de fonctionnement adaptés selon le type de production et l'état du système. Ces modes comptent un programme test permettant de vérifier le bon fonctionnement des composants du *ST*, un mode semi-automatique dédié à une production en série ou par lots ainsi qu'un mode manuel dédié à une production multiproduit et utilisable dans le cas de dysfonctionnement des systèmes de contournement comme mode de fonctionnement dégradé. Le mémoire compte aussi la proposition d'un mode de fonctionnement automatique utilisant des systèmes de reconnaissance de produits basés sur des étiquettes électroniques. Ce mode est particulièrement intéressant pour des gammes de production complexes et pour la catégorie de production multiproduit.

Les essais pratiques de ce travail de recherche ont prouvé l'efficacité des méthodes proposées, pour améliorer la flexibilité et la robustesse des *ST*. Ces applications sont réalisées dans un atelier test, à travers la conception et la réalisation des programmes de commande de trois gammes de production. Ces réalisations démontrent la pertinence de la méthode de décomposition hiérarchique de la partie physique et commande du *ST*, en

facilitant la conception et la réalisation des programmes de commande et en réduisant les temps de ces opérations. En outre, les applications ont prouvé l'efficacité des méthodes proposées pour la détection et le contournement des situations de blocage ainsi que l'orientation des produits, en utilisant une gamme de production à utilisation multiple d'un même poste de travail.

Les concepts proposés dans ce mémoire sont utilisables pour tout *ST* utilisant des convoyeurs et des transporteurs, avec des postes de travail ayant des espaces réservés aux files d'attente. De plus, ces systèmes doivent offrir la possibilité de contourner les postes de travail, via des stations de transfert et des transporteurs de contournement. Le circuit de manutention de ces *ST* peut être linéaire, en forme de U ou en boucle fermée. Les *ST* à base d'*AGV* ne sont pas concernés par le présent travail de recherche.

Il est important d'effectuer d'autres travaux de recherche concernant ce sujet, faisant la conception et la réalisation de programmes pour un mode de fonctionnement automatique, avec un système de reconnaissance de produits. Le mode automatique s'avère d'une grande utilité pour la production multiproduit dans laquelle plusieurs produits avec des gammes de production différentes sont manutentionnés simultanément par le *ST*. Cette diversité des produits nécessite la réalisation de programmes capables de les identifier systématiquement pour pouvoir les orienter efficacement, selon leurs gammes de production. Cette identification permettra aux programmes de commande de savoir le poste de provenance de chacun des produits, pour pouvoir par la suite l'orienter vers sa prochaine destination, en lisant sa gamme de production. Cette dernière peut être enregistrée directement sur une étiquette électronique ou dans une base de données et indexée par une simple référence insérée dans l'étiquette. Cette deuxième option permet de réduire la taille mémoire des étiquettes utilisées ce qui diminue les coûts (proportionnels à la taille mémoire) et accélère les processus de lecture et de transfert des données entre les étiquettes et le système de commande.

La méthode de décomposition logique proposée dans ce mémoire sera d'une grande utilité lors de la conception et la réalisation des programmes du mode automatique. En fait, tous les sous-programmes des unités de travail et des programmes de transfert sont utilisables en mode automatique, seul la lecture et le traitement des données enregistrées dans les étiquettes électroniques doivent être programmées, ainsi qu'un programme principal permettant la gestion de ces données et la communication entre les différents sous-programmes. La gestion des situations de blocage peut être gérée en utilisant la méthode de gestion des files d'attente proposée dans ce mémoire. Le problème d'orientation des produits pour la réutilisation des postes de travail dans la même gamme ne se pose plus, grâce aux étiquettes électroniques. Leur lecture permet de savoir à tout moment la provenance et par conséquent la bonne destination d'un produit.

Le développement d'outils de simulation adaptés aux *ST* peut jouer un rôle important dans l'amélioration de leur rendement et de leur efficacité. Ces outils peuvent notamment servir à prédire les situations de blocage pour pouvoir les éviter. En production multiproduit, la simulation d'un *ST* permettra d'identifier les produits dont la présence simultanée dans le système génère le plus de produit en cours et de faible taux de production. Toujours dans le contexte de production multiproduit, et dans l'objectif d'améliorer le rendement des *ST*, il serait d'une grande utilité de faire des projets dont l'objectif est d'optimiser l'ordonnancement de l'introduction des différents produits dans le *ST*. Cela permettra de savoir à quelle cadence chacun des produits sera introduit dans le système, par rapport aux autres produits, de façon à augmenter le nombre de produits finis par unité de temps (un quart de travail, par exemple).

La méthode de localisation des situations de blocage proposée dans ce mémoire est basée sur une procédure manuelle. Malgré l'efficacité de cette méthode pour des gammes de production à faible et moyen niveau de complexité, il serait important de développer des méthodes informatisées permettant de proposer les trajectoires potentielles d'une gamme de production et de localiser les chevauchements possibles.

Ces méthodes peuvent être basées sur des modèles de réseaux des nœuds, représentant les postes de travail ou les stations de transfert et des arcs représentant les segments de trajectoires exécutés par les transporteurs et les convoyeurs. Cette automatisation de la procédure permettra des gains de temps considérables, lors de la conception des programmes de commande en mode automatique ou semi-automatique, pour des gammes de production complexes.

BIBLIOGRAPHIE

- ALI, S., MACIEJEWSKI, A.A., SIEGEL, H.J., JONG-KOOK K. (2003). Definition of a robustness metric for resource allocation. Parallel and Distributed Processing Symposium, 2003. Proceedings. International, 10 pp.
- BAHRI, N., GASKINS, R.J. (2000). Automated material handling system traffic control by means of node balancing. Winter simulation conference 2000, 2:1344–6.
- BERRUET, P., MOUCHARD, J.S., PHILIPPE, J.L., GUYOMAR, J.P. (2001). Modeling and validation of transitive systems based on reusable components. In proceedings of IIIS/IEEE conference SCI'2001, Orlando, 3, 286-291.
- BESCHORNER, A., GLUER, D., (2003). MaxFlow theory for availability calculation of automated material handling systems. Robotics and Computer-Integrated Manufacturing, 19 (1-2), 141-145.
- BOYER, I., (2004). Gestion des pièces de rechange. Mémoire de maîtrise, département de mathématiques et de génie industriel, École polytechnique de Montréal, 140 pp.
- CARLSON, J. M. and DOYLE, J. (2002). Complexity and robustness. Proceedings of the National Academy of Sciences USA, 99, 2538-2545.
- BUSSMANN, S., SCHILD, K. (2000). Self-organizing manufacturing control: An industrial application of agent technology. In Proc. of the 4th Int. Conf. on Multi-Agent Systems (ICMAS 2000), Boston, MA, SA 2000, 87–94.
- BUSSMANN, S., SCHILD, K. (2001). An agent-based approach to the control of flexible production systems. Emerging Technologies and Factory Automation, Proceedings. 2001 8th IEEE International Conference, 2, 15-18 Oct., 481 – 488.

COUDERT, T., BERRUET, P., PHILIPPE, J.L. (2002). From design to integration of transitive systems a component-based approach. IECON Proceedings (Industrial Electronics Conference), 3, 2497-2502.

COUDERT, T., BERRUET, P., PHILIPPE, J.L. (2003). Integration of reconfiguration in transitive systems: an agent-based approach. Systems, Man and Cybernetics, 2003. IEEE International Conference, 4, 4008 – 4014.

KINDLER, E., COUDERT, T., BERRUET, P. (2004). Component-based simulation for a reconfiguration study of transitive systems. Simulation, 80 (3), 153-163.

LALLICAN, J.L., BERRUET, P., PHILIPPE, J.L. (2006). SIMSED : un environnement pour modéliser et simuler des systèmes transitiqs. 6e Conférence Francophone de MOdélisation et SIMulation - MOSIM'06, Rabat, Maroc, 3-5 avril 2006, 8 p.

LAWLEY, M.A. (1999). Deadlock avoidance for production systems with flexible routing. Robotics and Automation, IEEE Transactions, 15 (3), 497 – 509.

LAWLEY, M., REVELIOTIS, S., and FERREIRA, P. (1997). Design guidelines for deadlock handling strategies in flexible manufacturing systems. International journal of flexible manufacturing systems, 9 (7), 5-29.

LUO, M., ZHANG, J.B., WONG, M.M., ZHUANG, L.Q., NG, K.C. and AUNG, S.W. (2005). A Heuristic Approach to Auto-Recovery in a Supervisory Control of Heterogeneous Automatic Equipment for Material Handling. Proceedings of The 31th Annual Conference of the IEEE Industrial Electronics Society (IECON'05), North Carolina, 6-10 November, Vol.1, 2325-2330.

MOUCHARD, J.S., BERRUET, P., PHILIPPE, J.L., GUYOMAR, J.P. (2000). Modeling, simulating and validation: an application to the design of transitive systems. In : Proceedings of IFAC MCPL2000, Grenoble, 109-114.

SANCHOY-DAS, K. (1996). The Measurement of Flexibility in Manufacturing Systems. The International Journal of Flexible Manufacturing Systems, 8, 67-93.

SANKAR, S.S., RAJKUMAR, R., PONNAMBALAM, S.G., GURUMARIMUTHU, M. (2004). Integrated scheduling of material handling and manufacturing activities in flexible manufacturing system. Systems, Man and Cybernetics, 2004 IEEE International Conference, 10-13 Oct., 5, 4254- 4259.

SETHI, A. K., SETHI, S. P. (1990). Flexibility in Manufacturing: A. Survey. International Journal of Flexible Manufacturing Systems, 2 (4), 289–328.

TUAN LE-ANH and DE KOSTER, M.B.M. (2006). A review of design and control of automated guided vehicle systems. European Journal of Operational Research, 171 (1), 1-23.

TZONG-MING CHENG, (2004). On-line Deadlock Avoidance for Complex Routing Flexible Manufacturing Cells. International Journal of Applied Science and Engineering, 2 (2), 163-176.

VALCKENAERS P., BRUSSEL H.V., (2003). Deadlock avoidance in flexible flow shops with loops. J Intell. Manuf. 14, 137–144.

WANG, F. K., and LIN, J. T., (2004). Performance evaluation of an automated material handling system for a wafer fab. Robotics and Computer-Integrated Manufacturing, 20 (2), 91-100.

WONG, M.M., TAN, C.H., ZHANG, J.B., ZHUANG, L.Q., ZHAO, Y.Z., LUO, M. (2007). On-line reconfiguration to enhance the routing flexibility of complex automated material handling operations. Robotics and Computer-Integrated Manufacturing, 23 (3), 294-304.

WU, N. Q. (1997). Avoiding deadlocks in automated manufacturing systems with shared material handling system. In: Proc. 1997 IEEE Int. Conf. Robot. Automat., 2427–2433.

Annexe A

Exemple de vérification de l'ordre des tests des files d'attente pour éviter les situations de blocage

En prenant en considération le fait que les opérations d'évacuation des produits vers la sortie du *ST* sont toujours prioritaires, il serait plus efficace de **commencer par le test des files d'attente des postes de destination**. Cela offre l'avantage d'amener le plus vite possible les produits vers les postes éloignés de la gamme, et par la suite vers la sortie du système, permettant ainsi de réduire les temps d'attente (postes vides) des postes de travail : soit la gamme **entrée - P_a - P_b - P_c - sortie**, plus que le dernier poste P_c est servis, plus que les produits finis sont nombreux, car la libération de ses produits vers la sortie du système est prioritaire, cela permet de baisser sa file d'attente. Une courte file d'attente du P_c donne plus de chance que P_b soit prioriser, car la file d'attente de son poste de destination (P_c) a toujours tendance de baisser. La même chose est valable entre **P_a - P_b** et **Entrée - P_a** , ce qui donne l'introduction de plus de produit au poste P_a , augmentant ainsi la quantité totale des produits traités par le système. Cette justification se résume comme suit (avec FA P_x : file d'attente du poste x):

- ⇒ P_c est le dernier poste de la gamme ⇒ priorité de libération de produits au P_c ;
- ⇒ libération de produits au P_c ⇒ plus de produits finis & F.A P_c diminue;
- ⇒ F.A P_c augmente ⇒ chances de priorisé P_b augmente;
- ⇒ chances de priorisé P_b augmente ⇒ chances de priorisé P_a augmente;
- ⇒ chance de priorisé P_a augmente ⇒ chance d'introduction de nouveaux produits augmente.

L'exemple suivant illustre l'avantage de commencer par l'évaluation des files d'attente des postes de destination qui correspondent aux postes de travail qui sont à l'origine du problème de blocage. Cet exemple, prend en considération les hypothèses suivantes :

- gamme de production : P1 – P4 – P3 causant un blocage entre P1 et P4 (voir la sous-section 6.5.2 du chapitre 6);
- situation de blocage entre P1 et P4 (P3 est toujours prioritaire car sa destination et la sortie du système);
- Introduction d'un plateau chaque **1 min**;
- déplacement d'un plateau entre PE et P1 : **1 min**;
- déplacement d'un plateau entre P1 et P4 : **1 min**;
- déplacement d'un plateau entre P4 et P3 : **1 min**;
- déplacement d'un plateau entre P3 et la sortie : **1 min**;
- temps d'opération de P1 : **2 min**;
- temps d'opération de P3 : **2 min**;
- temps d'opération de P4 : **1 min**.

La trajectoire de la gamme de production est illustrée à la figure A.1.

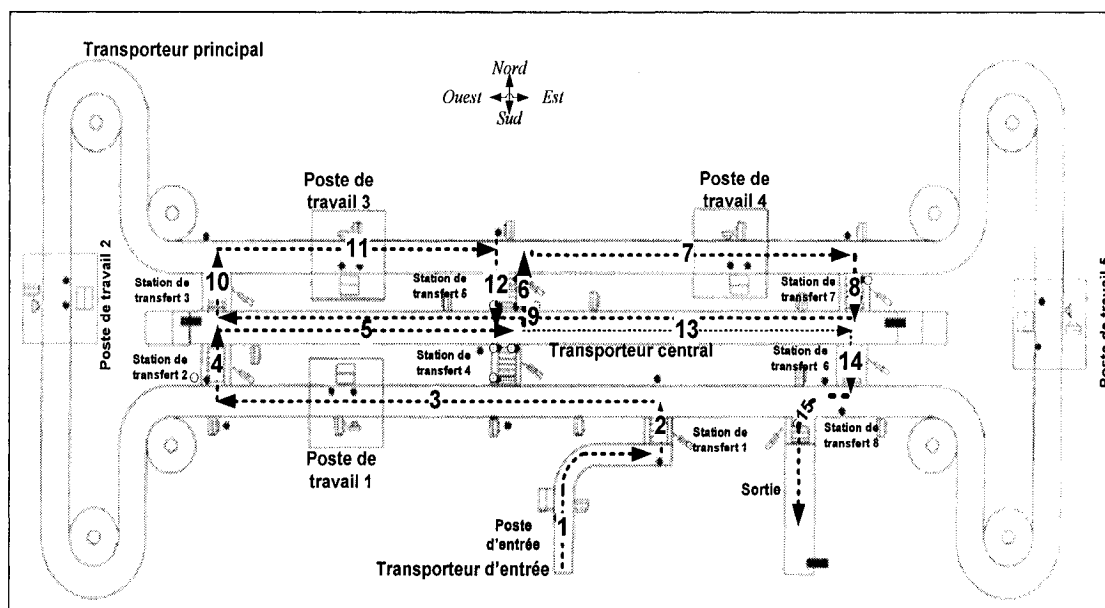


Figure A. 1. Trajectoire de la gamme P1 – P4 – P3

Analyse 1 : en premier lieu, le test est effectué sur les files d'attente des postes concernés par le blocage (P1 et P4), suivit par celui des files d'attente leurs postes de

destination (P4 et P3). Le tableau A.1 présente l'évolution de l'état des files d'attente des trois postes de travail.

Tableau A. 1. Évolution des files d'attente (analyse 1)

t [min]	P1	P3	P4	Entrée/sortie des produits	Nombre total de produits dans le ST
0	1	0	0	Introduction	1
1	2 (Q à t=3)	0	0	Introduction	2
2	3 (Q à t=4)	0	0	Introduction	3
3	<i>FAI</i> : 3 (Q à t = 5) PL quittant P : 1	0	0	Introduction	4
4	PL au P1 : 3 (Q à t = 6) PL quittant P1 : 1	0	1 (Q à t = 5)	Introduction	5
5	<i>Prioritaire (FAI > FA4)</i> <i>FAI</i> : 3 (Q à t = 7) PL quittant P1 : 1	0	2	Introduction	6
6	<i>Prioritaire (FAI > FA4)</i> <i>FAI</i> : 3 (Q à t = 8) PL quittant P1 : 1	0	3	Introduction	7
7	<i>Prioritaire (FAI > FA4)</i> <i>FAI</i> : 4 (Q à t = 9) PL quittant P1 : 1	0	3	Introduction	8
8	<i>Prioritaire (FAI > FA4)</i> <i>FAI</i> : 4 (Q à t = 9)	0	4 <i>Prioritaire :</i> <i>(FAI=FA4)</i> & <i>(FA.PD4 < FA.PD1)</i> PL au P4 : 3 PL quittant P4 : 1		8
9		1			

Légende : $Q \text{ à } t = n$: le produit doit quitter le poste de travail au temps $t = n$ min.

PL : plateau.

FA : file d'attente.

$FA.PDx$: file d'attente du poste de destination du poste x .

Dans cet exemple, la procédure de test de files d'attente consiste à comparer en premier lieu les files d'attente des postes causant le blocage. Dans le contexte des temps d'opération présentés au début de la section, cette façon de faire cause beaucoup de retard. Cela se manifeste ainsi : à la minute 4, le poste P4 reçoit un produit qu'il doit traiter et libérer à la cinquième minute, alors que ceci n'est possible qu'à la 8^e minute, lorsque la file d'attente de P4 devient égale à celle de P1 et la file d'attente du postes de destination de P4 est inférieure à celle de P1. Ce retard cause le blocage des postes P4 et P3 qui ne reçoit aucun produit jusqu'à la 9^e minute. D'autre part si la comparaison des files d'attente commence par celles des postes de destination (**analyse 2**), le poste P4 pourra libérer le produit à la 5^{ème} minute, permettant ainsi de pouvoir traiter un nouveau produit et offrant la possibilité au poste P3 de réduire son temps d'attente. Ce qui donne les résultats indiqués au tableau A.2 :

Tableau A. 2. Évolution des files d'attente (analyse 2)

t [min]	P1	P3	P4	Entrée/sortie de produits	Nombre total de produits dans le ST
0	1	0	0	Introduction	1
1	2 (Q à t=3)	0	0	Introduction	2
2	3 (Q à t=4)	0	0	Introduction	3
3	FAI : 3 (Q à t=5) PL quittant P1 : 1	0	0	Introduction	4
4	FAI : 3 (Q à t=6) PL quittant P1 : 1	0	1 (Q à t=5)	Introduction	5
5	FAI : 4	0	Prioritaire : ($FA.PD4 <$ $FA.PD1$) $FA4$: 1 PL quittant P4 : 1	Introduction	6
6		1			

Dans ce premier cas, il est évidant que le fait de commencer par la comparaison des files d'attente des postes de destination est meilleur, car cette option permet d'avoir un produit au poste P3 dès la 6^e minute au lieu de la 9^e.

N.B. Dans le cas où la comparaison des temps d'opérations était en deuxième position de tests, même à la 8^e minute le poste P4 ne pourra pas libérer son plateau, car à ce stade, les files d'attente de P1 et P4 sont égale (4 plateaux), alors que le temps d'opération de P1 (2 min) est supérieure à celui de P4 (1 min). Cela signifie que c'est P1 qui a la priorité de libération, alors que cela est impossible car son poste de destination (P4) est saturé (files d'attente = 4 plateaux) : **c'est une sérieuse situation de blocage**. Pour cette raison, la comparaison des temps d'opérations est située au dernier lieu, après la comparaison des files d'attente.

Annexe B

Ancien et nouveau système d'automate programmable

Tableau B. 1. Unité centrale de l'ancien système

Caractéristiques	TPMX 67425
Taille mémoire maxi	224 Kmots
Instruction bit	0.50 μ s
Opération logique	9 μ s
Opération flottante	48.9 μ s
Bus multipoint	UNI-TELWAY

Tableau B. 2. Module d'entrées logiques de l'ancien système

Caractéristiques	TSX DET 1604
Nombre de modules	4
Nombre d'entrées par module	16
Tension	110-120 VCA.
Courant	16-20.5 mA
Fréquence	50-60 Hz
Impédance d'entrée	5500 à 7800 Ohms
Temps de réponse max	23 ms
Puissance dissipée	0.30 W

Tableau B. 3. Module de sorties logiques de l'ancien système

Caractéristiques	TSX DST 1604
Nombre de module	4
Nombre de sortie par module	16
Tension	100 – 120 VCA
Courant nominal	1A
Fréquence	50 -60 Hz
Charge totale dans le module	8 A
Temps de réponse max	10 ms

Tableau B. 4. Module de sorties Analogiques de l'ancien système

Caractéristiques	TSX ASR 401
Nombre de sorties de tension	4
Sorties de tension	± 10 V
Résolution	12 bits (un bit de signe).

Cartes de communication de l'ancien système

L'ancien système utilisait deux modules **SCM2014** sur COM1 et COM2 de l'automate.

Ces modules servaient à établir la communication entre les transducteurs OMRON V600-H11 des mémoires SRAM (V600 D8K R04, 8Kbyte) et l'automate. Chacun de ces modules communique avec 3 transducteurs.

Tableau B. 5. Nouveau système d'API

Quantité	Référence	Description
4	TSXDEY16A4	120 VAC, 50/60Hz, 16 isolated input module, IEC type 2, conection via removable screw terminal block w
4	TSXDSY16S4	24-120 VAC, 50/60Hz, 16 Triac outputs module 1.0A, conection via removable screw terminal block whic
1	TSXASY410	4 channel analog output module, isolated, voltage and current (+/- 10V, 0-10V, 4-20mA, 0-20mA) 12 bit
2	TSXSCY21601	TSX Premium Serial Communications Module, (1) EIA-485 Multi-protocol Serial Port [25pt Sub-D], (1) T
2	TSXSCP114	RS 422/485 multiprotocol card, PCMCIA type III format
9	TSXBLY01	20 Point terminal block for discrete and analog I/O modules
1	TSXTLYEX	TSX Premium Terminator pair for BUSX Extendible Racks
2	TSXRKY8EX	TSX Premium 8 Position BUSX Extendible Rack
2	TSXPSY2600M	TSX Premium Power Supply, 100/240 VAC, 26 W, isolated
1	TSXCBY010K	1 meter bus X drop cable equipped with 2 SUB-D 9 pin connectors
Automate avec un maximum de 380 KB de taille mémoire		
1	TSXP573623M	TSX Premium Processor, 64/80*Kwords integrated, 2 RS485 programming ports (Native Uni-Telway pro)
1	TSXMRPC448K	SRAM MEM 448KB CONF

Annexe C

Adressages et câbles des capteurs et des actionneurs du *ST*

Tableau C. 1. Adresses et câbles des capteurs du *ST*

Câble	Entrée API	Capteur	Câble	Entrée API	Capteur
521	I100.0	N.U.	1001	I102.0	Tr4px1
531	I100.1	BP1	1011	I102.1	Tr4px2
541	I100.2	Man_P1	1021	I102.2	N.U.
551	I100.3	Auto_P1	1031	I102.3	Tr5px1
581	I100.4	BP2	1061	I102.4	Tr5px2
591	I100.5	Man_P2	1071	I102.5	N.U.
601	I100.6	Auto_P2	1081	I102.6	Tr6px1
611	I100.7	BP3	1091	I102.7	Tr6_7px2
641	I100.8	Man_P3	1121	I102.8	Tr7px1
651	I100.9	Auto_P3	1131	I102.9	Tr8px1
661	I100.10	BP4	1141	I102.10	Cap_sortie
671	I100.11	Man_P4	1151	I102.11	N.U.
701	I100.12	Auto_P4	1181	I102.12	RS1
711	I100.13	BP5	1191	I102.13	RS2
721	I100.14	Man_P5	1201	I102.14	RS3
731	I100.15	Auto_P5	1211	I102.15	RS4
761	I101.0	St1px1	1241	I103.0	RS5
771	I101.1	St1px2	1251	I103.1	RS6
781	I101.2	St2px1	1261	I103.2	RS7
791	I101.3	St2px2	1271	I103.3	RS8
821	I101.4	St3px1	1301	I103.4	N.U.
831	I101.5	St3px2	1311	I103.5	N.U.
841	I101.6	St4px1	1321	I103.6	N.U.
851	I101.7	St4px2	1331	I103.7	N.U.
881	I101.8	St5px1	1361	I103.8	N.U.
891	I101.9	St5px2	1371	I103.9	N.U.
901	I101.10	Tr1px1	1381	I103.10	N.U.
911	I101.11	Tr1px2	1391	I103.11	N.U.
941	I101.12	Stepx1	1421	I103.12	N.U.
951	I101.13	Tr2px1	1431	I103.13	N.U.
961	I101.14	Tr2_3px2	1441	I103.14	N.U.
971	I101.15	Tr3px1	1451	I103.15	N.U.

Légende : **RS X** : moteur X en surcharge; **N.U.** : entrée non utilisée.

Tableau C. 2. Adresses et câbles des actionneurs du *ST*

Câble	Sortie <i>API</i>	Actionneur	Câble	Sortie <i>API</i>	Actionneur
1482	Q104.0	St1ev1	1702	Q105.0	Tr3ev1
1492	Q104.1	St1ev2	1712	Q105.1	Tr3ev2
1502	Q104.2	St2ev1	1722	Q105.2	N.U.
1512	Q104.3	St2ev2	1732	Q105.3	Tr4ev1
1542	Q104.4	St3ev1	1762	Q105.4	Tr4ev2
1552	Q104.5	St3ev2	1772	Q105.5	Tr4ev3
1562	Q104.6	St4ev1	1782	Q105.6	Tr4-5ev4
1572	Q104.7	St4ev2	1792	Q105.7	Tr4-5ev5
1602	Q104.8	St5ev1	1822	Q105.8	Tr4-5ev6
1612	Q104.9	St5ev2	1832	Q105.9	Tr5ev1
1622	Q104.10	Tr1ev1	1842	Q105.10	N.U.
1632	Q104.11	N.U.	1852	Q105.11	Tr5ev3
1662	Q104.12	Steev1	1882	Q105.12	N.U.
1672	Q104.13	Tr2ev1	1892	Q105.13	Tr6ev1
1682	Q104.14	Tr2ev2	1902	Q105.14	Tr6ev2
1692	Q104.15	N.U.	1912	Q105.15	N.U.
1942	Q106.0	Tr7ev1	2162	Q6.0	Re1
1952	Q106.1	Tr7ev2	2172	Q6.1	Re2
1962	Q106.2	N.U.	2182	Q6.2	Re3
1972	Q106.3	Tr8ev1	2192	Q6.3	Re4
2002	Q106.4	Tr8ev2	2222	Q6.4	N.U.
2012	Q106.5	Tr8ev3	2232	Q6.5	N.U.
2022	Q106.6	C_1	2242	Q6.6	N.U.
2032	Q106.7	C_2	2252	Q6.7	N.U.
2062	Q106.8	C_3	2282	Q6.8	N.U.
2072	Q106.9	C_4	2292	Q6.9	N.U.
2082	Q106.10	N.U.	2302	Q6.10	N.U.
2092	Q106.11	Lt1	2312	Q6.11	N.U.
2122	Q106.12	Lt2	2342	Q6.12	N.U.
2132	Q106.13	Lt3	2352	Q6.13	N.U.
2142	Q106.14	Lt4	2362	Q6.14	N.U.
2152	Q106.15	Lt5	2372	Q6.15	N.U.

Légende :

- C_1**: sortie logique permettant la commande des moteurs des convoyeurs des stations de transfert 1(vers le nord) et 8 (vers le sud);
- C_2**: sortie logique permettant la commande des moteurs des convoyeurs des stations de transfert 2 et 3 (vers le nord), 6 et 7 (vers le sud);
- C_3**: sortie logique permettant la commande des moteurs des convoyeurs des stations de transfert 4 et 5 (rotation vers le nord);
- C_4**: sortie logique permettant la commande des moteurs des convoyeurs des stations de transfert 4 et 5 (rotation vers le sud);
- LtX**: voyant témoin du poste de travail X (avec X= 1, 2, 3, 4, ou 5);
- Re1**: sortie logique permettant la commande du transporteur d'entrée;
- Re2**: sortie logique permettant la commande du transporteur principal;
- Re3**: sortie logique permettant la commande du transporteur central en rotation vers l'est;
- Re3 & Re4**: sorties logiques permettant la commande du transporteur central en rotation vers l'ouest;
- N.U.**: sortie non utilisée.