HAL
open science

# Contrôle par le produit des systèmes d'exécution de la production : apport des techniques de synthèse

David Gouyon

▶ **To cite this version:**

David Gouyon. Contrôle par le produit des systèmes d'exécution de la production : apport des techniques de synthèse. Autre. Université Henri Poincaré - Nancy 1, 2004. Français. NNT : 2004NAN10194 . tel-01748095

**HAL Id: tel-01748095**

**https://hal.univ-lorraine.fr/tel-01748095**

Submitted on 29 Mar 2018

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

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

UNIVERSITÉ DE LORRAINE

AVERTISSEMENT

Ce document est le fruit d'un long travail approuvé par le jury de soutenance et mis à disposition de l'ensemble de la communauté universitaire élargie.

Il est soumis à la propriété intellectuelle de l'auteur. Ceci implique une obligation de citation et de référencement lors de l'utilisation de ce document.

D'autre part, toute contrefaçon, plagiat, reproduction illicite encourt une poursuite pénale.

Contact : ddoc-theses-contact@univ-lorraine.fr

LIENS

Code de la Propriété Intellectuelle. articles L 122. 4
Code de la Propriété Intellectuelle. articles L 335.2- L 335.10
http://www.cfcopies.com/V2/leg/leg_droi.php
http://www.culture.gouv.fr/culture/infos-pratiques/droits/protection.htm

FACULTE DES SCIENCES & TECHNIQUES

**U.F.R. Sciences et Techniques Mathématiques, Informatique et Automatique**
**Ecole Doctorale IAEM Lorraine**
**Département de Formation Doctorale Automatique**

# Thèse

Présentée pour l'obtention du titre de

## Docteur de l'Université Henri Poincaré, Nancy-I

en Automatique, Traitement du Signal, Génie Informatique

par **David GOUYON**

# Contrôle par le produit des systèmes d'exécution de la production : apport des techniques de synthèse

Soutenue publiquement le 6 décembre 2004

Membres du jury :

| | | |
|---|---|---|
| Président : | M. Jean-Jacques LESAGE | Professeur, ENS Cachan |
| Rapporteurs : | Mme Véronique CARRE-MENETRIER | Professeur, Université de Reims Champagne-Ardenne |
| | M. Jean-Pierre BOUREY | Professeur, Ecole Centrale de Lille |
| Examinateurs : | M. Alain RICHARD | Professeur, UHP, Nancy I |
| | M. Gérard MOREL | Professeur, UHP, Nancy I (Directeur de thèse) |
| | M. Jean-François PETIN | Maître de Conférences, UHP, Nancy I (Codirecteur de thèse) |
| Invitée : | Mlle Alexia GOUIN | Maître de Conférences, UJF, Grenoble 1 |

Centre de Recherche en Automatique de Nancy
Faculté des sciences et Techniques – 54500 Vandoeuvre lès Nancy

**REMERCIEMENTS**

Les travaux de recherche présentés dans ce mémoire ont été développés au Centre de Recherche en Automatique de Nancy (CRAN, UMR 7039 du CNRS) dirigé par le Professeur Francis LEPAGE que je remercie vivement pour son accueil au sein du laboratoire.

Au terme de ces travaux, je tiens tout particulièrement à remercier Madame Véronique CARRE-MENETRIER, Professeur à l'Université de Reims Champagne-Ardenne, et Monsieur Jean-Pierre BOUREY, Professeur à l'Ecole Centrale de Lille, pour avoir accepté d'évaluer cette contribution scientifique en qualité de rapporteurs.

Je remercie également Monsieur Alain RICHARD, Professeur à l'Université Henri Poincaré Nancy 1, ainsi que Monsieur Jean-Jacques LESAGE, Professeur à l'Ecole Normale Supérieure de Cachan, pour l'intérêt qu'ils ont porté à ces travaux en tant qu'examinateurs.

Je tiens à remercier Mademoiselle Alexia GOUIN, Maître de Conférence à l'Université Joseph Fourier Grenoble 1, pour avoir accepté notre invitation à participer à ce jury.

Je tiens à exprimer ma reconnaissance et mes remerciements les plus sincères à mes Co-Directeurs de thèse, Monsieur Gérard MOREL, Professeur à l'Université Henri Poincaré Nancy 1, et Monsieur Jean-François PETIN, Maître de Conférences à l'Université Henri Poincaré Nancy 1, pour la confiance qu'ils m'ont accordée, ainsi que pour leurs nombreux conseils qui ont permis de donner une orientation originale à mes travaux.

Je remercie l'ensemble des membres du CRAN, ainsi que le personnel de l'AIP-PRIMECA Lorraine, pour les fructueuses discussions que j'ai pu avoir avec eux, pour leurs conseils, pour leur soutien, et qui ont contribué, d'une manière ou d'une autre, à l'aboutissement de ces travaux.

Enfin, un très grand merci à mes parents et à ma famille pour leur compréhension et leur soutien tout au long de ces années.

# TABLE DES MATIERES

**INTRODUCTION** ..... **3**

**CHAPITRE 1 : CONTROLE PAR LE PRODUIT DE SYSTEMES DE PRODUCTION MANUFACTURIERE** ..... **9**

1.1. INTRODUCTION ..... 9

1.2. SYSTEME-ENTREPRISE CONTROLE PAR LE PRODUIT ..... 9
*1.2.1. Personnalisation de masse des produits* ..... *9*
*1.2.2. Impacts de la personnalisation de masse des produits sur l'automatisation de la production* ..... *11*
1.2.2.1 Contrôlabilité ..... 11
1.2.2.2 Observabilité des produits ..... 12
1.2.2.3 Complexité ..... 12

1.3. ARCHITECTURES DES SYSTEMES DE PRODUCTION ..... 13
*1.3.1. Des Systèmes Intégrés de Production …* ..... *14*
1.3.1.1 Systèmes intégrés de gestion et d'exécution ..... 14
1.3.1.2 Intégration des systèmes de gestion et d'exécution ..... 16
*1.3.2. …aux Systèmes Contrôlés par le Produit* ..... *20*
1.3.2.1 Le concept d'Holon ..... 21
1.3.2.2 Systèmes contrôlés par le produit ..... 25
1.3.2.3 Conclusion ..... 27

1.4. SITUATION DE TRAVAIL : L'ATELIER INTER-ETABLISSEMENTS DE PRODUCTIQUE LORRAIN ..... 28
*1.4.1. Présentation de l'AIP* ..... *28*
1.4.1.1 Présentation du site et des équipements ..... 28
1.4.1.2 Présentation des matières premières, des en-cours et des produits ..... 29
1.4.1.3 Présentation du procédé de fabrication des produits ..... 29
1.4.1.4 Présentation de la structure des systèmes d'informations mis en place ..... 30
*1.4.2. Personnalisation des produits à l'AIP* ..... *31*
1.4.2.1 Impact sur l'automatisation du système de production ..... 31
1.4.2.2 Impact sur les systèmes de gestion ..... 31
*1.4.3. Conclusion sur le cadre de travail de l'AIPL* ..... *33*

1.5. CONCLUSION ..... 33

**CHAPITRE 2 : INGENIERIE DES SYSTEMES CONTROLES PAR LE PRODUIT** ..... **37**

2.1. INTRODUCTION ..... 37

2.2. CADRES DE MODELISATION DES SYSTEMES CONTROLES PAR LE PRODUIT ..... 37

2.3. PREDICATS D'AUTOMATISATION POUR LES SYSTEMES CONTROLES PAR LE PRODUIT ..... 42
*2.3.1. Distribution du contrôle* ..... *42*
*2.3.2. Approche produit / processus* ..... *44*

2.4. TECHNIQUES DE SYNTHESE POUR LE CONTROLE PAR LE PRODUIT ..... 46
*2.4.1. Principes de base du contrôle par supervision* ..... *46*
2.4.1.1 Théorie du contrôle par supervision ..... 46
2.4.1.2 Algorithmes de synthèse de superviseur ..... 48
*2.4.2. Application à la synthèse de la commande* ..... *49*
2.4.2.1 Modélisation du procédé et des spécifications ..... 49
2.4.2.2 Implantation de la commande obtenue par synthèse ..... 53
2.5. CONCLUSION ..... 56

**CHAPITRE 3 : MODELISATION DES SYSTEMES CONTROLES PAR LE PRODUIT ..... 61**

3.1. INTRODUCTION ..... 61

3.2. MODELISATION DES SYSTEMES CONTROLES PAR LE PRODUIT ..... 61
*3.2.1. Représentation des flux circulant dans un système de production contrôlé par le produit ..... 62*
*3.2.2. Identification des holons-produits dans les flux ..... 65*
*3.2.3. Structuration des processus contrôlés par le produit ..... 66*
3.2.3.1 Boucle de contrôle par le produit ..... 66
3.2.3.2 Boucle de contrôle des ressources ..... 67

3.3. EXTRACTION DES MODELES DE COMPORTEMENT ..... 70
*3.3.1. Modèles des ressources assurant les processus ..... 70*
*3.3.2. Modèle des processus nécessaires à la fabrication du produit ..... 72*

3.4. APPLICATION A L'EXEMPLE DE L'AIPL ..... 75
*3.4.1. Détermination du modèle de spécification d'un produit ..... 75*
*3.4.2. Détermination des modèles des ressources contrôlées par le produit ..... 76*

3.5. CONCLUSION ET PERSPECTIVES SUR LA METHODE DE MODELISATION ..... 77

**CHAPITRE 4 : SYNTHESE DE LA COMMANDE DES SYSTEMES CONTROLES PAR LE PRODUIT ..... 81**

4.1. INTRODUCTION ..... 81

4.2. METHODE DE SYNTHESE STRUCTUREE ET D'IMPLANTATION DES CONTROLEURS ..... 82
*4.2.1. Synthèse de superviseurs modulaires ..... 82*
4.2.1.1 Principe de la synthèse structurée de la commande ..... 82
4.2.1.2 Synthèse des superviseurs du niveau le plus bas (noté niveau 1) ..... 83
4.2.1.3 Démarche récurrente ..... 83
4.2.1.4 Obtention des modèles de procédé de niveau n+1 ..... 83
4.2.1.5 Synthèse d'un superviseur de niveau n+1 (coordination de modules de niveau n) ..... 85
4.2.1.6 A propos de la propriété de non-blocage des superviseurs modulaires ..... 86
*4.2.2. Interprétation et implantation des superviseurs modulaires ..... 87*
4.2.2.1 Règle de traduction 1 : priorités ..... 88
4.2.2.2 Règle de traduction 2 : codage par activation / désactivation synchrone ..... 89
4.2.2.3 Exemple d'application des règles de traduction ..... 89
4.2.2.4 Développement d'un outil logiciel ..... 90
*4.2.3. Vue globale de la démarche proposée ..... 91*

4.3. APPLICATION SUR LE MANIPULATEUR D'UN POSTE D'ASSEMBLAGE DU SYSTEME FLEXIBLE DE PRODUCTION DE L'AIP ..... 91
*4.3.1. Synthèse d'un module de commande du niveau 1 ..... 94*
*4.3.2. Obtention du modèle de procédé de niveau 2 ..... 97*
*4.3.3. Interprétation / implantation ..... 99*

4.4. DISCUSSION SUR LA METHODE ..... 99
*4.4.1. Influence des marquages ..... 102*
*4.4.2. Influence de la structure des automates ..... 103*
*4.4.3. Impact aux différents niveaux de la structure de commande ..... 105*

4.5. CONCLUSION ..... 105

**CHAPITRE 5 : SYNTHESE DE TRAJECTOIRES DE PRODUCTION CONTROLEES PAR LE PRODUIT ..... 109**

5.1. INTRODUCTION ..... 109

5.2. PRINCIPE ..... 109

5.3. SYNTHESE DE TRAJECTOIRE ..... 111
*5.3.1. Modèles nécessaires à la synthèse ..... 111*
5.3.1.1 Modèle de spécification : les procédés de fabrication des produits ..... 111
5.3.1.2 Modèle des ressources de production : fusion des modèles unitaires ..... 112
*5.3.2. Résultat de la synthèse de trajectoire ..... 115*
*5.3.3. Utilisation des trajectoires synthétisées ..... 116*
5.3.3.1 Pour le contrôle par le produit ..... 116
5.3.3.2 Pour le suivi : insertion dans la base de données du MES ..... 121

5.4. APPLICATION A UN EXEMPLE : SYNTHESE DU CONTROLE POUR UN PRODUIT 01-09 ASSEMBLE SUR LE SYSTEME FLEXIBLE DE PRODUCTION DE L'AIP ..... 122
*5.4.1. Description des opérations à faire sur le produit ..... 123*
*5.4.2. Description des ressources assemblant le produit ..... 124*
*5.4.3. Obtention du modèle global des ressources ..... 125*
*5.4.4. Obtention du superviseur d'un produit ..... 125*
*5.4.5. Choix d'une trajectoire ..... 126*

5.5. CONCLUSION ..... 128

**CONCLUSION ET PERSPECTIVES ..... 131**

**REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES ..... 137**

**ANNEXE ..... 153**

# TABLE DES FIGURES

FIGURE 1 : STRUCTURE DES ENTREPRISES DE PRODUCTION MANUFACTURIERE ..... 3
FIGURE 2 : INTEGRATION PAR LE PRODUIT DES SYSTEMES DE PILOTAGE ET D'EXECUTION DE LA PRODUCTION ..... 4
FIGURE 3 : SYNOPTIQUE DE LA DEMARCHE DE THESE ..... 5
FIGURE 4 : PERSONNALISATION D'UN PRODUIT DEPUIS UN SITE INTERNET LORS DU PASSAGE DE LA COMMANDE . 10
FIGURE 5 : SCENARIO MONTRANT L'AUGMENTATION DE LA COMPLEXITE LOGICIELLE ET LA DIMINUTION DE LA DISPONIBILITE DU SYSTEME (JOHNSON 2004)..... 13
FIGURE 6 : INTERPRETATION DE LA METRIQUE EICM (HOLLOCKS *ET AL.* 1997) ..... 13
FIGURE 7 : STRUCTURE HIERARCHIQUE D'UN COMPLEXE MANUFACTURIER SELON LE CIM (D'APRES ANSI/ISA-95.00.01-2000) ..... 14
FIGURE 8 : FONCTIONS INTEROPERABLES, MAIS NIVEAUX VISIBLES..... 15
FIGURE 9 : L'ENTREPRISE SOUS UN ANGLE DE PRODUCTION (DESPRES 1991)..... 16
FIGURE 10 : ECHELLES DE TEMPS DES DIFFERENTS SYSTEMES ..... 17
FIGURE 11 : OBJECTIF DE LA NORME ANSI/ISA-95 : DEFINITION D'UNE INTERFACE ENTRE LA GESTION ET LA PRODUCTION ..... 18
FIGURE 12 : MODELE UML DE LA DEFINITION D'UN PRODUIT D'APRES LA NORME ISA/ANSI-95.00.02 ..... 19
FIGURE 13 : MODELE UML D'UN SEGMENT DE PROCESSUS (*PROCESS SEGMENT*) D'APRES ANSI/ISA-95.00.02..... 20
FIGURE 14 : FORME D'UN SYSTEME HOLONIQUE..... 21
FIGURE 15 : ARCHITECTURE GENERALE D'UN HOLON SELON MCFARLANE ET BUSSMANN (DANS DEEN 2003)..... 22
FIGURE 16 : HOLONS DE BASE ET LEURS RELATIONS, D'APRES (VAN BRUSSEL *ET AL.* 1998) ..... 23
FIGURE 17 : DU CONTROLE PAR LES PROCESSUS AU CONTROLE PAR LE PRODUIT (MCFARLANE *ET AL.* 2002)..... 25
FIGURE 18 : SCENARIO ILLUSTRANT UN CONTROLE DE LA PRODUCTION PAR LE PRODUIT..... 26
FIGURE 19 : CELLULE FLEXIBLE D'ASSEMBLAGE..... 28
FIGURE 20 : EXEMPLES DE PIECES ET DE PRODUITS DE TYPE AIP..... 29
FIGURE 21 : PROCEDE DE FABRICATION DES PRODUITS AIP..... 30
FIGURE 22 : STRUCTURE DES SYSTEMES D'INFORMATION A METTRE EN PLACE SUR L'AIP ..... 30
FIGURE 23 : SAISIE DE LA NOMENCLATURE SOUS L'ERP X3 ..... 32
FIGURE 24 : CREATION ET CONFIGURATION D'UNE ROUTE DE FABRICATION DANS LE MES INTRACK ..... 32
FIGURE 25 : CADRE DE MODELISATION GERAM (ISO 1998) ..... 38
FIGURE 26 : REPARTITION DES DONNEES ET DES TRAITEMENTS DANS LES HOLONS DE BASE DE PROSA (VAN BRUSSEL *ET AL.* 1998) ..... 39
FIGURE 27 : AGREGATION D'HOLONS-RESSOURCES D'APRES VALCKENAERS *ET AL.* (1998) ..... 39
FIGURE 28 : INTERACTION ENTRE DEUX HOLONS POUR DE L'ORDONNANCEMENT (BONGAERTS 1998)..... 40
FIGURE 29 : EXEMPLE DE DIAGRAMME DE PROCESSUS MODELISE A L'AIDE DE MEGA ..... 41
FIGURE 30 : ELEMENTS DU FORMALISME GRAPHIQUE DE MEGA PROCESS ..... 41
FIGURE 31 : PRINCIPE D'UTILISATION D'UN FILTRE DE COMMANDE ..... 43
FIGURE 32 : EXEMPLE DE FILTRE DE COMPORTEMENT PLACE EN INTERFACE..... 43
FIGURE 33 : UTILISATION RECURSIVE DE FILTRES DE COMMANDE (BELHIMEUR 1989)..... 44
FIGURE 34 : LIEN ENTRE LES OBJETS DE LA NORME ET LES ELEMENTS DU CONTROLE PAR LE PRODUIT..... 45
FIGURE 35 : BOUCLE DE CONTROLE PAR SUPERVISION..... 47
FIGURE 36 : AUTOMATE DECRIVANT UNE MACHINE SIMPLE : (A) MODELE FORMEL, (B) REPRESENTATION GRAPHIQUE. D'APRES NDJAB (1999)..... 47
FIGURE 37 : PRINCIPE DE LA SYNTHESE DE SUPERVISEUR ..... 48
FIGURE 38 : STRUCTURE DE COMMANDE MODULAIRE..... 51
FIGURE 39 : CONTROLE PAR SUPERVISION DECENTRALISEE (LIN & WONHAM 1990) ..... 51
FIGURE 40 : MODELE DE ZHONG..... 51
FIGURE 41 : PROCEDURE DE SYNTHESE DE CONTROLEUR PROCEDURAL SELON (SANCHEZ & MACCHIETO 1995) .. 52
FIGURE 42 : LES ETAPES DE L'APPROCHE DE SYNTHESE HORS LIGNE (NDJAB & ZAYTOON 1999) ..... 53
FIGURE 43 : PRINCIPE DE LA COMMANDE SUPERVISEE SELON CHARBONNIER (1996) ..... 54
FIGURE 44 : INTERPRETATION EN ENTREES/SORTIES DU CONTROLE PAR SUPERVISION SELON BALEMI *ET AL.* (1993) ..... 55
FIGURE 45 : EXEMPLE D'ALTERNANCE DE SEQUENCE D'ENTREES/SORTIES AUTORISEE ..... 55
FIGURE 46 : INTERPRETATION D'UN AUTOMATE EN LADDER DIAGRAM SELON FABIAN & HELLGREN (1998)..... 56
FIGURE 47 : INTEROPERABILITE ASSUREE PAR L'UTILISATION DE MODELES COMMUNS..... 57
FIGURE 48 : OBJETS UTILISES DANS NOTRE APPROCHE ET LEURS LIENS ..... 62
FIGURE 49 : COMPOSITION D'UN HOLON..... 62
FIGURE 50 : EXEMPLE DE SUITE DE PROCESSUS PERMETTANT LA FABRICATION DE PRODUITS ..... 63
FIGURE 51 : ROUTES DES PRODUITS ET DEPENDANCES MATERIELLES ..... 63
FIGURE 52 : ROUTAGE POUR UN PRODUIT (ANSI/ISA-95.00.02-2001) ..... 63

FIGURE 53 : DIFFERENTES REPRESENTATIONS POUR DIFFERENTS TYPES DE FLUX ..... 64
FIGURE 54 : LES PROCESSUS SONT CAPABLES DE TRAITER DES FLUX DE PLUSIEURS TYPES ..... 64
FIGURE 55 : CIRCULATION DE FLUX D'HOLONS ENTRE LES PROCESSUS DE FABRICATION CONTROLES PAR LE PRODUIT ..... 64
FIGURE 56 : RAFFINEMENT DES FLUX D'HOLONS EN FLUX D'INFORMATIONS ET DE MATIERE ..... 65
FIGURE 57 : LE *PRODUIT A* EST DANS LE FLUX *PRODUITS* ..... 65
FIGURE 58 : REPERAGE D'UN PRODUIT DANS LES DIFFERENTS FLUX DANS LESQUELS IL CIRCULE LORS DE SA FABRICATION ..... 65
FIGURE 59 : CLASSE REPRESENTANT LES PRODUITS ..... 65
FIGURE 60 : BOUCLE CYBERNETIQUE APPLIQUEE A UN SYSTEME AUTOMATISE (LHOTE *ET AL.* 1999) ..... 66
FIGURE 61 : BOUCLE DE CONTROLE PAR LE PRODUIT ..... 66
FIGURE 62 : SOUS-PROCESSUS COMPOSANT UN PROCESSUS ..... 67
FIGURE 63 : STRUCTURE GENERIQUE DES PROCESSUS CONTROLES PAR LE PRODUIT ..... 68
FIGURE 64 : ECHANGES PRODUIT - RESSOURCES ..... 68
FIGURE 65 : DEFINITION D'UNE SEQUENCE SELON VOGEL (1988) ..... 69
FIGURE 66 : LES SEQUENCES DE CONTROLE DES PROCESSUS DEBUTENT PAR UNE REQUETE EMISE PAR LE PRODUIT ET S'ACHEVENT PAR UN COMPTE-RENDU TRANSMIS AU PRODUIT ..... 69
FIGURE 67 : IMBRICATION ET ENCHEVETREMENT DE SEQUENCES (VOGEL 1988) ..... 69
FIGURE 68 : MODELISATION DE L'INTERACTION PRODUIT – RESSOURCE ..... 70
FIGURE 69 : L'ETAT "OP 1" CORRESPOND A UN ENSEMBLE D'ETATS NON VUS PAR LE PRODUIT ..... 71
FIGURE 70 : EXEMPLE DE MODELE D'UNE RESSOURCE CAPABLE DE REALISER 3 PROCESSUS (4 ETATS) ..... 71
FIGURE 71 : MODELE DE RESSOURCE DE DEPLACEMENT ..... 72
FIGURE 72 : SUCCESSION DES SEGMENTS DE PRODUIT (EXTRAIT DE ANSI/ISA-95) ..... 72
FIGURE 73 : ZOOM SUR LA SUITE DES PROCESSUS, FAISANT APPARAITRE LES INFORMATIONS ECHANGEES ENTRE LE PRODUIT ET LES RESSOURCES ..... 73
FIGURE 74 : AUTOMATE A ETATS REPRESENTANT LES TRANSFORMATIONS SUCCESSIVES DU PRODUIT ..... 73
FIGURE 75 : POSSIBILITE DE FLEXIBILITE DANS LA MODELISATION DES SPECIFICATIONS DES PRODUITS ..... 74
FIGURE 76 : SEPARATION (FIN DE VIE) D'UN PRODUIT EN DEUX COMPOSANTS (DEBUT DE CYCLE DE VIE) ..... 74
FIGURE 77 : EXEMPLE DE PROCESSUS D'ASSEMBLAGE D'UN PRODUIT *A* ..... 74
FIGURE 78 : MODELE DE SPECIFICATION DE LA FABRICATION D'UN ASSEMBLAGE ..... 75
FIGURE 79 : LE PRODUIT 01-09 REF 0455 APPARTIENT SUCCESSIVEMENT A DIFFERENTS FLUX AU COURS DE SON PROCESSUS D'ASSEMBLAGE ..... 75
FIGURE 80 : MODELE DE SPECIFICATION DU PRODUIT 01-09 REF 0455 ..... 75
FIGURE 81 : MODELES DE LA STRUCTURE INTERNE DES PROCESSUS D'ASSEMBLAGE 01 ET 09 ..... 76
FIGURE 82 : MODELE DU POSTE 4 CAPABLE D'ASSURER LES ASSEMBLAGES DE PIECES 09 ET 10 ..... 77
FIGURE 83 : MODELE DU COMPORTEMENT DU CONVOYEUR ..... 77
FIGURE 84 : METHODE DE MODELISATION DES SYSTEMES CONTROLES PAR LE PRODUIT PERMETTANT L'EXTRACTION DE MODELES FORMELS DE COMPORTEMENT ..... 78
FIGURE 85 : UTILISATION DES MODELES DANS LES PHASES DE SYNTHESE ..... 78
FIGURE 86 : ECHANGE DE REQUETES ET DE COMPTES-RENDUS ENTRE LES PRODUITS ET LES RESSOURCES ..... 81
FIGURE 87 : COHERENCE ASSUREE PAR STRUCTURATION DES PROCESSUS SELON UN MODELE DE REFERENCE ..... 82
FIGURE 88 : SYNTHESE D'UN SUPERVISEUR DE NIVEAU 1 ..... 83
FIGURE 89 : PROCEDE UTILISE POUR LA SYNTHESE D'UN SUPERVISEUR DE NIVEAU N+1 ..... 84
FIGURE 90 : EVENEMENTS DE DIFFERENTS NIVEAUX APPARTENANT A L'ALPHABET D'UN SUPERVISEUR ..... 84
FIGURE 91 : LA CONTROLABILITE DES EVENEMENTS VARIE EN FONCTION DU NIVEAU DES SUPERVISEURS DANS LA STRUCTURE DE COMMANDE ..... 85
FIGURE 92 : EXEMPLE DE COMPOSITION SYNCHRONE D'AUTOMATES : C = A || B ..... 85
FIGURE 93 : FORME GENERIQUE D'UNE SPECIFICATION DE COMMANDE EN COORDINATION - ACTINOMIE ..... 86
FIGURE 94 : EXEMPLE DE MODULES COORDONNEES (A ET B) DONT LES ALPHABETS SONT DISJOINTS ..... 86
FIGURE 95 : EXEMPLE DE SYNTHESE D'UN SUPERVISEUR DE COORDINATION BLOQUANT UN DES MODULES DE NIVEAU INFERIEUR ..... 87
FIGURE 96 : EXEMPLE PRESENTANT LES PRIORITES UTILISEES ..... 88
FIGURE 97: TRADUCTION ALGEBRIQUE PAR ACTIVATION/DESACTIVATION ..... 89
FIGURE 98 : EXEMPLE DE TRADUCTION ALGEBRIQUE EN LADDER DIAGRAM ..... 90
FIGURE 99 : PRINCIPE DE FONCTIONNEMENT DE TCT2SPEX ..... 90
FIGURE 100 : PRINCIPE DE LA SYNTHESE MODULAIRE (GOUYON *ET AL.* 2002) ..... 91
FIGURE 101 : HUIT EMPLACEMENTS POSSIBLES ..... 91
FIGURE 102 : SCHEMA CINEMATIQUE DU MANIPULATEUR D'UN POSTE D'ASSEMBLAGE DU SFP ..... 92
FIGURE 103 : PIECES DISPONIBLES DANS LES MAGASINS DES POSTES DU SFP ..... 92
FIGURE 104 : EXEMPLES DE PRODUITS ASSEMBLES SUR LE SFP ..... 92

FIGURE 105 : STRUCTURE DU SYSTEME DE COMMANDE DU MANIPULATEUR ..... 93
FIGURE 106 : ELEMENT DE PARTIE OPERATIVE ..... 94
FIGURE 107 : MODELE DU COMPORTEMENT D'UN EPO DE TYPE BISTABLE ..... 94
FIGURE 108 : MODELE UTILISE POUR LA SYNTHESE DU MODULE DE COMMANDE DE PLUS BAS NIVEAU ..... 95
FIGURE 109 : DESCRIPTION DES SPECIFICATIONS DE COMMANDE DE MANIERE PARCELLAIRE AVANT COMPOSITION ..... 95
FIGURE 110 : SUPERVISEUR DU MODULE DE COMMANDE DE PLUS BAS NIVEAU ASSOCIE A UN EPO BISTABLE ..... 96
FIGURE 111 : EXEMPLE D'INSTANCE DE SUPERVISEUR DU MODULE DE CONTROLE DE L'EPO "VERIN Y" ..... 96
FIGURE 112 : PROJECTION DES SUPERVISEURS DES EPO "VERIN Z" ET "VENTOUSE" SUR L'ALPHABET DES DEMANDES ET DES ETATS ..... 97
FIGURE 113 : MODELE DE SPECIFICATION DE LA FONCTION "PRENDRE / POSER" ..... 97
FIGURE 114 : SUPERVISEUR DE LA FONCTION "PRENDRE / POSER" ..... 98
FIGURE 115 : EXEMPLE DE MODELE DE SPECIFICATIONS DU MANIPULATEUR ..... 98
FIGURE 116 : EXEMPLE DE PROJECTION DU SUPERVISEUR D'UN MANIPULATEUR CAPABLE D'ASSEMBLER DES PIECES DE TYPE 09, 10 ET 88 ..... 99
FIGURE 117 : EXTRAIT DE CODE AUTOMATE IMPLANTE (FONCTION « MANIPULER ») ..... 99
FIGURE 118 : TEST RELATIFS A LA STRUCTURE DES MODELES DE SPECIFICATIONS ..... 100
FIGURE 119 : MODELE DE SPECIFICATION DE COORDINATION DU MANIPULATEUR ..... 101
FIGURE 120 : TEST RELATIFS AU DEGRE DE PERMISSIVITE DES MODELES DES SPECIFICATIONS DE COORDINATION ..... 101
FIGURE 121 : EXEMPLES D'ASSERTIONS SPECIFIANT UN MODULE DE COMMANDE D'UN EPO ..... 103
FIGURE 122 : INTERACTION ENTRE LE MES ET LES AUTRES SYSTEMES D'INFORMATION DE L'ENTREPRISE ..... 110
FIGURE 123 : SYNTHESE DE TRAJECTOIRE A PARTIR D'INFORMATIONS DE LA BASE DE DONNEES DU MES ..... 110
FIGURE 124 : PRINCIPE DE LA SYNTHESE DES REGLES DE CONTROLE PAR LE PRODUIT ..... 111
FIGURE 125 : EXEMPLE DE GAMME LOGIQUE REPRESENTEE SOUS LA FORME D'UN AUTOMATE A ETAT FINIS ..... 111
FIGURE 126 : MODELE DE LA GAMME LOGIQUE UTILISEE POUR LA SYNTHESE ..... 112
FIGURE 127 : EXEMPLES DE MODELES DE RESSOURCES CONTROLEES PAR LE PRODUIT : 2 POSTES DE TRAVAIL ET UNE RESSOURCE DE TRANSPORT ..... 113
FIGURE 128 : EXEMPLE DE MODELE OBTENU PAR FUSION DE 2 STATIONS DE TRAVAIL ET D'UNE RESSOURCE DE TRANSPORT ..... 114
FIGURE 129 : PRINCIPE DE LA SYNTHESE DES TRAJECTOIRES ..... 115
FIGURE 130 : ENSEMBLE DES TRAJECTOIRES DE FABRICATION CONTROLEES PAR LE PRODUIT QUI SONT POSSIBLES ..... 115
FIGURE 131 : LES INFORMATIONS NECESSAIRES A LA PRISE DE DECISION PAR LE PRODUIT SONT DISPONIBLES DANS LA BASE DE DONNEES DU MES ..... 117
FIGURE 132 : INTERPRETATION DE L'AUTOMATE DES TRAJECTOIRES POSSIBLES EN GRAPHE PONDERE ..... 118
FIGURE 133 : EXEMPLE D'EXECUTION DE L'ALGORITHME DE DIJKSTRA ..... 119
FIGURE 134 : DECISION PRISE PAR LE PRODUIT AU POSTE 1 : EMISSION DE *RQ OPERATION 1* ..... 119
FIGURE 135 : STRUCTURE D'ACCUEIL POUR LES TRAJECTOIRES SYNTHETISEES ..... 120
FIGURE 136 : PROJECTION SUR L'ALPHABET DES COMPTES-RENDUS ..... 121
FIGURE 137 : PROCEDURES DE CREATION DES ROUTES DANS LA BASE DE DONNEES SQL DU MES INTRACK ..... 122
FIGURE 138 : ROUTES DISPONIBLES DANS LA BASE DE DONNEES DU MES ..... 122
FIGURE 139 : PRODUIT DE TYPE 01-09 ASSEMBLE SUR LE SFP ..... 123
FIGURE 140 : GAMME LOGIQUE DE L'ASSEMBLAGE DU PRODUIT 01-09 ..... 123
FIGURE 141 : AUTOMATE DE LA GAMME LOGIQUE UTILISE POUR LA SYNTHESE ..... 124
FIGURE 142 : MODELES DES POSTES DU SFP ..... 124
FIGURE 143 : MODELE DU SFP, D'UN POINT DE VUE "CONTROLE PAR LE PRODUIT" ..... 125
FIGURE 144 : TRAJECTOIRES POSSIBLES POUR LE PRODUIT POUR ETRE FABRIQUE PAR LA CELLULE ..... 126
FIGURE 145 : GRAPHE REPRESENTANT LES POIDS DE CHAQUE TRANSITION (TEMPS OPERATOIRES) ..... 126
FIGURE 146 : TRAJECTOIRE CHOISIE PARMI CELLES SYNTHETISEES A L'INSTANT T ..... 127
FIGURE 147 : SIMULATION AVEC SPEX DES RESULTATS DE SYNTHESE ..... 127
FIGURE 148 : SITUATION DES TRAVAUX DE THESE ..... 131
FIGURE 149 : BILAN DE L'APPROCHE PROPOSEE ..... 132
FIGURE 150 : ARCHITECTURE APPLICATIVE NECESSAIRE A LA MISE EN PLACE D'UN MES COMPATIBLE AVEC LE CONTROLE PAR LE PRODUIT ..... 133
FIGURE 151 : DEMARCHE DE SYNTHESE STRUCTUREE UTILISEE SUR LE MANIPULATEUR ..... 157
FIGURE 152 : MODELE UTILISE POUR UN EPO DE TYPE BISTABLE ..... 158
FIGURE 153 : MODELES DE SPECIFICATIONS POUR LE SUPERVISEUR D'UN EPO BISTABLE ..... 159
FIGURE 154 : SUPERVISEUR D'UN EPO BISTABLE ..... 159
FIGURE 155 : MODELE UTILISE POUR UN EPO DE TYPE MONOSTABLE (« VERIN Z ») ..... 160

FIGURE 156 : MODELES DE SPECIFICATIONS POUR LE SUPERVISEUR D'UN EPO MONOSTABLE ..... 160
FIGURE 157 : SUPERVISEUR DE L'EPO MONOSTABLE « VERIN Z »..... 160
FIGURE 158 : PROJECTION DES SUPERVISEURS D'EPO SUR L'ALPHABET DES DEMANDES ET DES ETATS ..... 161
FIGURE 159 : SPECIFICATION DE COORDINATION PERMETTANT LA SYNTHESE DU SUPERVISEUR « PRENDRE/POSER » ..... 161
FIGURE 160 : SUPERVISEUR DE LA FONCTION « PRENDRE/POSER » ..... 162
FIGURE 161 : SPECIFICATION DE COORDINATION PERMETTANT LA SYNTHESE DU SUPERVISEUR « DEPLACER »... 162
FIGURE 162 : PROJECTION DU SUPERVISEUR DE LA FONCTION « PRENDRE/POSER » ..... 162
FIGURE 163 : PROJECTION DU SUPERVISEUR DE LA FONCTION « DEPLACER » ..... 163
FIGURE 164 : SPECIFICATION DU SUPERVISEUR DE LA FONCTION « MANIPULER » D'UN POSTE CAPABLE D'ASSEMBLER DES PIECES DE TYPE 09, 60 ET 88..... 163
FIGURE 165 : SUPERVISEUR ASSURANT LA FONCTION « MANIPULER » D'UN POSTE CAPABLE D'ASSEMBLER DES PIECES DE TYPE 09, 60 ET 88..... 164
FIGURE 166 : MODELE D'UN POSTE D'ASSEMBLAGE CAPABLE D'ASSEMBLER DES PIECES DE TYPE 09, 60 ET 88, VU DU PRODUIT..... 164

# *Introduction*

# INTRODUCTION

Les accès simples et efficaces aux informations, offerts par les Nouvelles Technologies de l'Information et de la Communication, conduisent à repenser l'intégration hiérarchique ERP/MES/Automatisation des procédés de production (Figure 1) au profit de structures distribuées plus flexibles et reconfigurables qui favorisent la traçabilité et la variabilité des produits (Da Silveira *et al*. 2001). Ces structures reposent sur un nombre limité de niveaux hiérarchiques :

- au niveau le plus bas, les processus d'exécution assurent les transformations spatiales, temporelles et morphologiques des produits physiques requises par le procédé de fabrication,
- au niveau le plus haut, les processus de gestion traitent les différents aspects informationnels relatifs aux produits et au pilotage de leur production,
- au niveau intermédiaire, les processus de pilotage de la production assurent à travers le temps la fluidification des biens et des services.

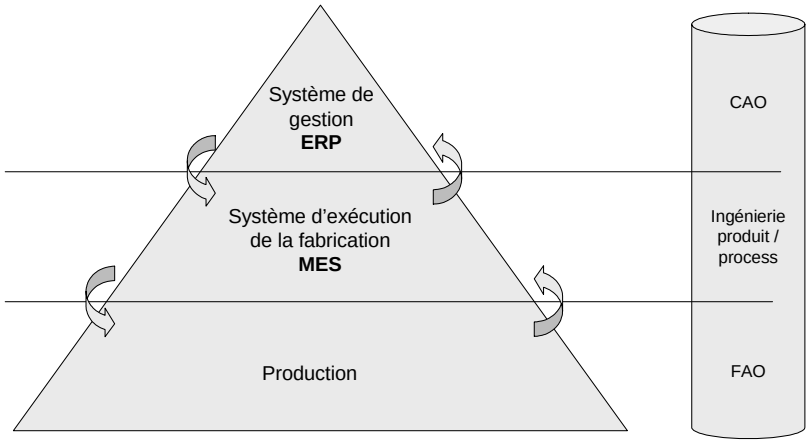



**Figure 1 : Structure des entreprises de production manufacturière**

La nature et les échelles de temps des flux physiques et informationnels traités à ces deux niveaux étant très différentes, il est important d'assurer leur cohérence. Ce besoin se trouve renforcé par la personnalisation de masse des produits (Da Silveira *et al*. 2001) dans la mesure où l'exécution et la gestion de la production doivent s'effectuer de manière spécifique à chaque produit. Maîtriser cette variabilité impose de pouvoir adapter le contrôle de la production aux particularités de chaque produit et d'assurer individuellement leur traçabilité.

En ce sens, le produit se place au centre du système de production. Il peut alors être considéré comme le pivot devant assurer la cohérence entre les niveaux de gestion et d'exécution de la fabrication (Figure 2).

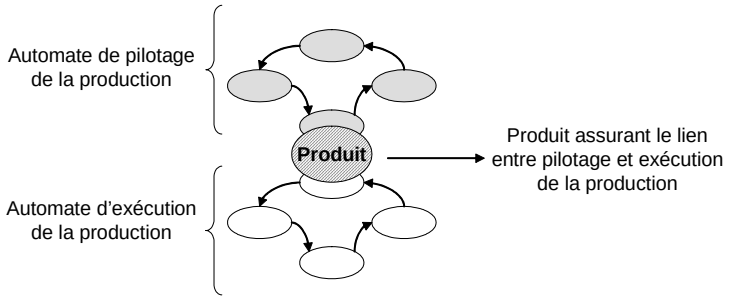



**Figure 2 : Intégration par le produit des systèmes de pilotage et d'exécution de la production**

Cette place importante donnée au produit (Munerato 1988, Craye 1994) a conduit au sein de la communauté IMS (Intelligent Manufacturing Systems) à la définition et à l'expérimentation des Systèmes Manufacturiers Holoniques (HMS) (Deen 2003) qui ont pour but de conférer au produit un rôle actif. Ainsi, dans ce cadre où l'intelligence est distribuée entre les différents acteurs de la production, et notamment dans le produit lui-même, automatiser implique de contrôler (par le produit) :

- *à l'instant t* les ressources qui assurent ses transformations d'états,
- *à travers le temps* les ressources qui assurent sa transformation à travers les différentes unités de production.

Ces nouveaux modèles d'organisation induisent de nouvelles méthodes d'ingénierie. Leur mise en œuvre repose sur une intégration plus forte de l'ingénierie des produits et des ingénieries relatives aux processus de gestion et à l'automatisation. En d'autres termes, l'ingénierie produit/processus aura à décliner le paradigme d'automatisation de Fusaoka *et al.* (1983), qui précise qu'il est possible de synthétiser automatiquement les règles (inconnues) de contrôle à partir d'une description de la dynamique des ressources et des spécifications du système automatisé, d'un point de vue du contrôle par le produit.

$$\textit{Dynamics} \wedge \textit{Unknown control rules} \supset \textit{Goal} \qquad (1)$$

Nous proposons deux déclinaisons de ce paradigme pour les systèmes contrôlés par le produit. La première exprime les propriétés à satisfaire pour générer une structure de commande des ressources contrôlées par le produit *à l'instant t* :

$$\begin{array}{ll} & \textit{Dynamique des ressources de production} \\ \wedge & \textit{Règles inconnues de contrôle par le produit des opérations} \\ \supset & \textit{Services requis par le produit} \qquad (2) \end{array}$$

La deuxième interprétation du paradigme (1) montre que le contrôle par le produit de la production peut être obtenu à partir de ses propres spécifications, en terme de procédé de fabrication, pour assurer la coordination par le produit des différentes ressources de production *à travers le temps* :

$$\begin{array}{ll} & \textit{Services proposés par les ressources de fabrication} \\ \wedge & \textit{Règles inconnues de contrôle par le produit de la production} \\ \supset & \textit{Gamme de fabrication du produit} \qquad (3) \end{array}$$

Dans le cadre de la théorie du contrôle par supervision (Supervisory Control Theory – SCT) (Ramadge & Wonham 1987), les techniques de synthèse formelle de la commande permettent

d'obtenir automatiquement une structure de contrôle à partir d'un modèle de procédé et d'objectifs à atteindre. En ce sens, nous modéliserons les systèmes contrôlés par le produit de manière à pouvoir utiliser les techniques de synthèse pour générer ce contrôle par le produit des ressources et de la production, tout en vérifiant par construction les prédicats (2) et (3).

Nous nous appuierons pour valider notre approche tout au long de ce manuscrit sur un exemple concret, celui de l'Atelier Inter-établissements de Production Lorrain, qui nous permet d'une part de mettre en évidence les problèmes liés à la variabilité des produits dans le cadre d'un système de production dont l'architecture est intégrée, mais également d'illustrer notre contribution à l'ingénierie d'automatisation des systèmes contrôlés par le produit.

Notre démarche, basée sur la structure générique des entreprises de production manufacturière, peut être résumée dans sa globalité par la Figure 3 :

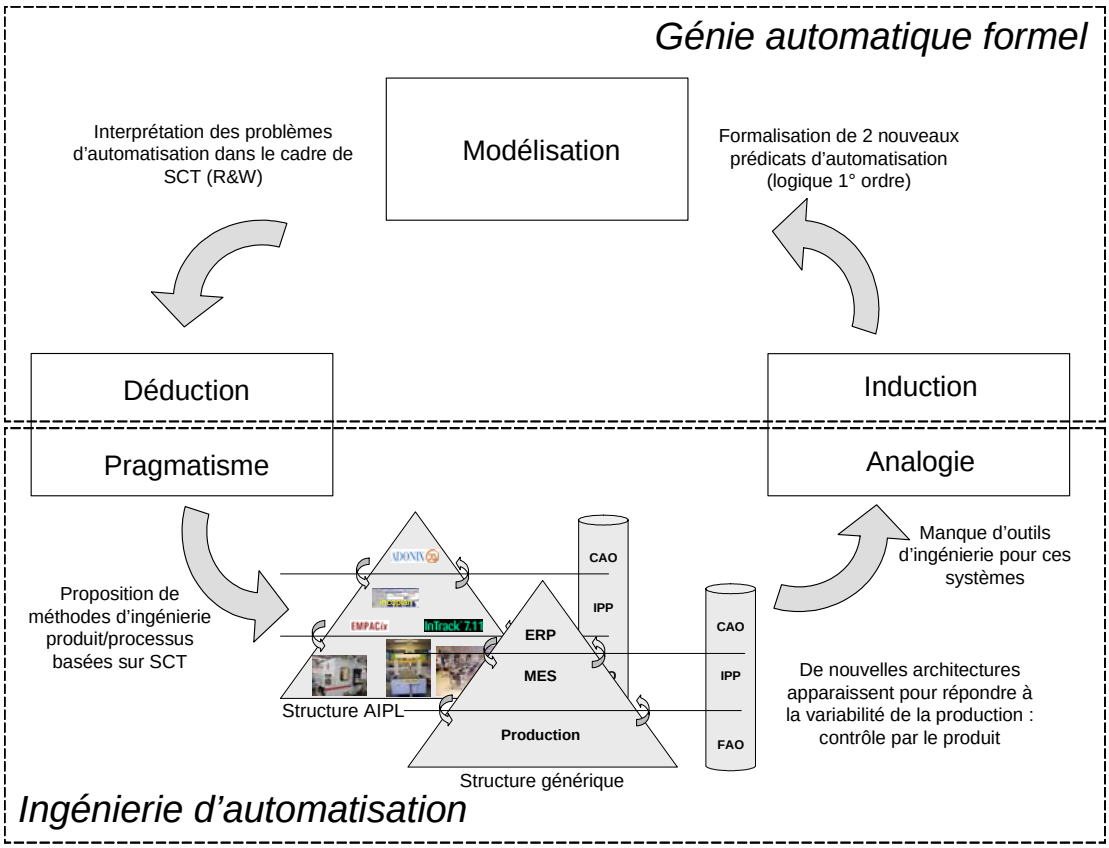



**Figure 3 : Synoptique de la démarche de thèse**

Notre mémoire, développé en cinq chapitres, illustre notre démarche avec le plan suivant :

Le premier chapitre présente la structure actuelle des entreprises et les contraintes auxquelles elles doivent aujourd'hui répondre face à un marché sur lequel les produits sont de plus en plus diversifiés, voire personnalisés. Cette personnalisation de masse, et la variabilité des produits qui en découle, a un impact important sur le système de production, qui doit être adaptable tout en assurant la traçabilité de chaque produit. Ce propos est illustré par un exemple, celui de l'Atelier Inter-établissements de Production Lorrain, sur lequel nous mettons en place les différents outils de pilotage et d'exécution de la fabrication dans un cadre de personnalisation des produits. Après avoir mis en évidence les difficultés d'une production de ce type, nous présentons le principe du contrôle par le produit. Ce dernier s'apparente aux

Systèmes Manufacturiers Holoniques (HMS) (Deen 2004), et contribue à la résolution de problèmes d'adaptabilité et de traçabilité.

L'ingénierie de ces Systèmes Contrôlés par le Produit (SCP) est traitée dans le second chapitre. Après une présentation des cadres, méthodologies, langages et outils de modélisation des systèmes holoniques, nous mettons en évidence les difficultés liées à leur application dans le cadre d'une ingénierie produit/processus. D'une part, la décentralisation de l'intelligence à tous les niveaux des systèmes (Pétin *et al*. 1998), y compris dans le produit, pose le problème de l'interaction entre composants concurrents, ce qui justifie l'utilisation de techniques formelles permettant de garantir la cohérence globale des applications. D'autre part, le concept de contrôle par le produit requiert la définition d'un contrôle propre à chaque instance de produit ce qui, couplé à une forte variabilité des produits, justifie le besoin d'automatiser cette procédure d'élaboration en ligne. Nous présentons les techniques formelles de synthèse automatique de la commande (Ramadge & Wonham 1987) qui vont nous permettre d'obtenir automatiquement le contrôle des produits, et formellement le contrôle des ressources.

L'utilisation des techniques de synthèse repose, dans notre cas, sur une phase de modélisation des systèmes contrôlés par le produit qui fait l'objet du troisième chapitre. Nous y introduisons une méthode intégrant les objets spécifiques au contrôle par le produit et aux HMS. Elle permet d'appréhender le problème du contrôle de la production par le produit, ainsi que d'extraire et de formaliser :

- les modèles de spécification du contrôle par le produit des ressources, nécessaires à la synthèse du contrôle par le produit des ressources,
- les modèles des ressources de production contrôlées par le produit, nécessaires à la synthèse du contrôle par le produit des trajectoires de production.

Ces modèles étant partagés entre le contrôle des ressources de production et le contrôle des trajectoires de production par le produit, la cohérence entre les deux vues est assurée *a priori*.

Le quatrième chapitre, destiné à aider le travail d'automatisation des ressources de production, présente une méthode utilisant les techniques de synthèse formelle de la commande basée sur les spécifications comportementales présentées au chapitre précédent. Afin d'assurer la flexibilité requise dans le cadre de systèmes contrôlés par le produit, nous proposons une démarche itérative et modulaire de synthèse fondée sur la notion d'objets fonctionnels d'automatisation (Lhoste & Morel 1996). Cette approche couvre également les phases d'interprétation et d'implantation des modules de commande.

Le cinquième et dernier chapitre de ce mémoire, se situe à l'interface du contrôle de la production et du MES. Il présente une méthode permettant d'obtenir de façon automatique le contrôle par le produit des trajectoires de production. Les spécifications nécessaires à la synthèse sont constituées d'un modèle formalisé des états successifs des produits (obtenu par la phase de modélisation présentée au chapitre 3). Le modèle de procédé est obtenu grâce à un opérateur de fusion, que nous avons proposé, qui permet de regrouper les vues « produit » des modèles de chaque ressource décrit dans le chapitre 4. Ce modèle de procédé correspond à l'ensemble des trajectoires de production possibles indépendamment des contraintes de fabrication liées aux produits.

# *Chapitre 1*

## Contrôle par le produit de systèmes de production manufacturière

# Chapitre 1 : Contrôle par le produit de systèmes de production manufacturière

## *1.1. Introduction*

Ce chapitre a pour objet de montrer la pertinence des architectures de « contrôle par le produit » des procédés manufacturiers.

Ce constat est d'abord élaboré à partir d'une analyse des limites du paradigme de l'intégration par l'information (Integration in Manufacturing) en regard des besoins informationnels croissants requis par la personnalisation des produits et la traçabilité de leurs instances. Nous illustrons ce constat sur l'exemple concret de l'AIPL, « Atelier *Intégré* de Productique », représentatif des systèmes d'entreprises actuels (ERP / MES / Systèmes de Contrôle).

Une alternative à cette intégration par l'information est de placer le produit au cœur de ces systèmes d'entreprise comme le prône l'initiative internationale de recherche et développement IMS (Intelligent Manufacturing Systems), notamment par la proposition du paradigme HMS (Holonic Manufacturing Systems).

Cette approche nous amène à définir d'une manière générale les caractéristiques d'un contrôle par le produit des procédés manufacturiers avant de considérer cette application du paradigme IiM (Intelligence in Manufacturing) dans le cas particulier de l'AIPL, « Atelier *Intelligent* de Production ».

## *1.2. Système-Entreprise contrôlé par le produit*

### *1.2.1. Personnalisation de masse des produits*

Avec le développement des « Nouvelles Technologies de l'Information et de la Communication » (NTIC), et notamment la généralisation de l'accès à Internet pour le grand public, il peut devenir relativement simple pour chaque client d'une entreprise d'accéder à son système d'information pour y saisir directement sa commande, sans la contrainte du personnel commercial de l'entreprise (Layne & Bougelsdijk 1998). Ainsi, l'accès étant direct sur le système d'information, il devient plus simple de personnaliser sa commande. En effet, via des portails Web, certains fabricants offrent la possibilité au client de configurer, voire de personnaliser le produit qu'il souhaite acheter (Figure 4). Il est possible de limiter les possibilités de personnalisation pour garder une certaine rentabilité de la production en se basant par exemple sur une « plateforme » commune à une famille de produits comme le préconisent Farrell & Simpson (2003).

**Figure 4 : Personnalisation d'un produit depuis un site Internet lors du passage de la commande**

Cette démarche va dans le sens de la personnalisation de masse (ou « mass customization » en anglais) (Da Silveira *et al.* 2001), un concept qui a émergé vers la fin des années 80 (Davis 1987, Kotler 1989). La personnalisation de masse se rapporte à l'aptitude à fournir des produits ou des services personnalisés dans des quantités importantes, grâce à des processus flexibles, et à des coûts raisonnables (Da Silveira *et al.* 2001).

Plusieurs définitions apparaissent dans la littérature. La première, plus large, présente la personnalisation de masse comme *l'aptitude à fournir à chaque client des produits et des services conçus individuellement grâce à un haut niveau d'agilité, de flexibilité et d'intégration du procédé*.

La seconde, plus précise car plus proche des aspects de rationalité de la production, définit la personnalisation de masse comme un *système utilisant les technologies de l'information, un processus de fabrication flexible et des structures organisationnelles afin de fournir un large choix de produits et de services qui correspondent aux besoins spécifiques et individuels des consommateurs*.

Le challenge à relever est donc de fournir des biens et des services qui satisferont au mieux les besoins personnalisés des consommateurs tout en conservant une efficacité proche de celle de la production de masse (Jiao *et al.* 2003). Il apparaît comme la suite logique de la flexibilisation des processus, ces derniers étant optimisés au niveau de la qualité et des coûts. Il s'agit d'une sorte de paradoxe auquel doivent faire face les industriels.

Ce paradoxe intéresse une large communauté de chercheurs et d'industriels. Pour preuve, des centres de recherche, comme le TUM Research Centre on Mass Customization & Customer Integration[1], s'y consacrent. Les intervenants proviennent de nombreux domaines, tels que l'économie, la production, … Des conférences sont également consacrées à cette problématique, comme par exemple la conférence « World Congress on Mass Customization

[1] http://www.mass-customization.de

and Personalization - MCPC », qui a eu lieu en 2001 et 2003 (Piller et al. 2003), et qui aura à nouveau lieu en 2005[2].

Les principales thématiques étudiées par cette communauté portent sur les moyens de répondre à une production de ce type, mais également sur les différents impacts au niveau du système de production.

### *1.2.2. Impacts de la personnalisation de masse des produits sur l'automatisation de la production*

Cette personnalisation des produits a différents impacts sur le système de production et sur l'entreprise (Bouwens & Abernethy 2000). En effet, dans un cadre classique, les produits sont gérés par lot. Avec des produits tous différents, ce type de gestion n'est plus possible. Il faut donc pouvoir contrôler individuellement la fabrication de chaque produit, et les suivre de manière distincte, c'est-à-dire assurer la contrôlabilité et l'observabilité de chaque *instance*[3] de produit.

#### 1.2.2.1 Contrôlabilité

Le système de production devra s'adapter à différentes configurations de la production, et en particulier à différents types de produits. En d'autres termes, le système de production devra être « agile », dans le sens défini par Quinn *et al.* (1997) : *Agile manufacturing is the ability to accomplish rapid changeover between the manufacture of different assemblies*.

La première propriété permettant de répondre à ce besoin est la flexibilité (Brueckner 1999) (Tsubone & Horikawa 1999) c'est-à-dire l'aptitude à s'adapter à différentes règles de production par l'intermédiaire d'un paramétrage ou d'une commutation entre plusieurs solutions initialement prévues.

Nous distinguerons deux types de flexibilité, la flexibilité des machines et la flexibilité des trajectoires de fabrication des produits :

- la flexibilité des machines est leur capacité à effectuer différentes opérations nécessaires à la fabrication d'un ensemble donné de types de pièces, en incluant des changements rapides ;
- la flexibilité des trajectoires (ou routes) est l'aptitude à fabriquer un ensemble donné de types de pièces en utilisant plus d'une trajectoire (routes alternatives) (Caprihan & Wadhwa 1997). Pour cela, les ressources assurant la production doivent être interchangeables, c'est-à-dire présenter une caractéristique d'interopérabilité de classe C (Morel 1999).

La flexibilité d'un système repose principalement sur les différentes combinaisons de l'ensemble de ces possibilités. Dans la mesure où un système n'est pas suffisamment flexible pour s'adapter à une nouvelle configuration de la production, sa reconfigurabilité peut lui permettre de le faire.

---

[2] http://www.mcpc2005.com

[3] Nous utilisons le terme *instance* dans ce mémoire pour désigner, non pas un objet « instance » d'une classe, mais plutôt pour exprimer que chaque produit est différent des autres, et que par conséquent, il doit être traité individuellement

*La reconfigurabilité du système de production est sa capacité à être reconfiguré, c'est-à-dire la capacité de sa structure à être modifiée pour que ce système soit adapté à un nouveau type de production, ou pour continuer à produire en présence de défaillances* (Toguyeni 2004).

On peut distinguer plusieurs types de reconfigurabilité, suivant que cette reconfiguration peut être faite « hors ligne » ou au contraire « en ligne » (« à chaud ») et si elle est initiée par le système ou par un élément extérieur (Brennan *et al.* 2001) (Klein 2004) :

- la reconfiguration simple correspond à un changement « hors ligne » de la structure du système par un élément extérieur, répondant à un besoin de flexibilité (paramétrage, exécution d'objets logiciels …) ;
- la reconfiguration dynamique correspond à une modification (ou mise à niveau) de la structure du système « en ligne » par un acteur extérieur ;
- la reconfiguration intelligente correspond à une modification « en ligne » du système, initiée par le système lui-même, pour répondre par exemple à un changement de production ou en fonction d'un retour permettant de contrôler la qualité de la fabrication.

Ce besoin de flexibilité et de reconfigurabilité doit pouvoir être pris en compte à tous les niveaux de la structure de l'entreprise, du système physique de production aux outils de gestion de la production. La reconfigurabilité et la flexibilité passent par la modularité des systèmes, à l'image, par exemple, de ce qui est fait dans le cadre du projet OOONEIDA (Auinger *et al.* 2004). Une condition nécessaire est donc de structurer les systèmes de gestion et de production de façon modulaire, à partir par exemple d'objets logiciels communicants.

#### 1.2.2.2 Observabilité des produits

Pour pouvoir fabriquer et suivre des produits individualisés, il est nécessaire d'observer leur partie physique (pour assurer les opérations de transformation), mais également d'avoir accès aux informations relatives à la production de chacun d'entre eux. Une définition générale de la traçabilité est *la possibilité de suivre un produit aux différents stades de sa production, de sa transformation et de sa commercialisation* (Pélissier & Nguyen 2000).

Le suivi des produits ou des lots de fabrication lors de leur production se fait classiquement par l'utilisation des fonctionnalités des systèmes de gestion, en liaison avec le système physique de production. Afin d'assurer la traçabilité de chaque instance de produit, il est nécessaire de les suivre individuellement, et de permettre leur observabilité (McFarlane 2003) au cours de la production. L'identification de chaque instance de produit semble être une condition nécessaire au suivi de chaque produit, et doit donc être incluse lors de la conception et de l'automatisation du système de production. Il est par exemple possible d'identifier les produits à l'aide d'étiquettes électroniques (RFID) ou de codes à barres.

#### 1.2.2.3 Complexité

Le contrôle et le suivi individuel de chaque produit augmentent le nombre des informations échangées et complexifient les systèmes de gestion et d'exécution de la production. Les principaux impacts sur le système de production sont sa réactivité et le besoin d'une ingénierie formelle.

Johnson (2004) a mis en évidence sur un scénario que la complexité, liée aux approches modulaires ou à objets, des logiciels qui assurent le fonctionnement des systèmes de production, entraîne une diminution de leur disponibilité, et par la même de leur efficacité (Figure 5). En ce sens, il montre le besoin de méthodes d'ingénierie formelles.

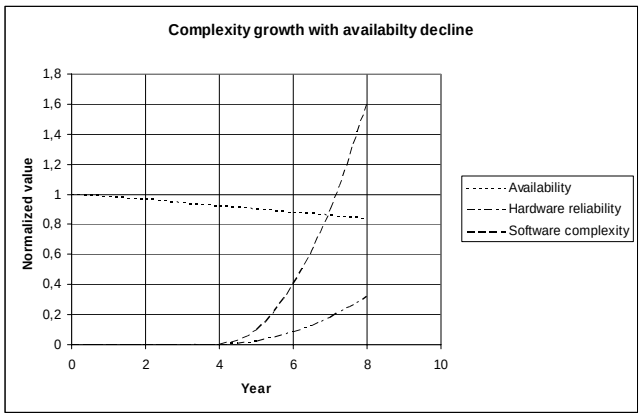



**Figure 5 : Scénario montrant l'augmentation de la complexité logicielle et la diminution de la disponibilité du système (Johnson 2004)**

L'impact sur la réactivité a été mis en évidence par Muhl *et al.* (dans Morel & Grabot 2003) qui précisent que la durée du calcul de la simulation nécessaire à une prise de décision dans un tel environnement peut s'avérer aussi longue que la fabrication elle même. Dans ce cas, ces simulations ne sont pas utilisables dynamiquement, mais peuvent être utilisées « hors ligne », lors de la conception du système de fabrication pour chercher un optimum global. A l'opposé, Qiu *et al.* (2003) proposent de réduire cette complexité en synthétisant dynamiquement en ligne les trajectoires des différents produits, en ne cherchant dans ce cas qu'un optimum local pour chaque type de produit.

Nous venons de voir que la personnalisation des produits engendrait un plus grand besoin de commandabilité et d'observabilité des produits, qui se traduisent en terme de flexibilité et de reconfigurabilité du système de production, ainsi qu'en terme de traçabilité des produits. Nous allons voir dans quelle mesure les architectures actuelles peuvent répondre à ces problèmes.

## *1.3. Architectures des systèmes de production*

Pour caractériser le niveau d'intégration et la capabilité des entreprises et des systèmes de production nous nous appuierons sur la métrique EICM (Enterprise Integration Capability Model) proposée par Hollocks *et al.* (1997) (Figure 6).

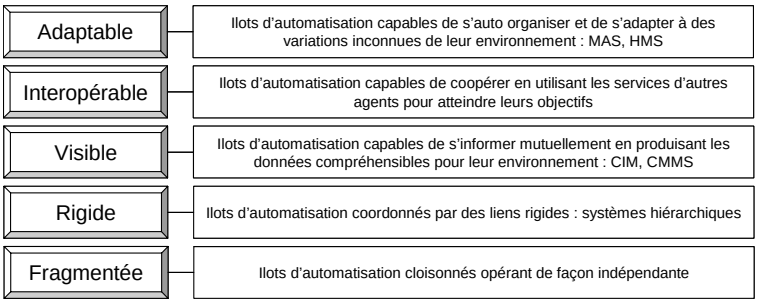



**Figure 6 : Interprétation de la métrique EICM (Hollocks *et al.* 1997)**

Nous allons en particulier montrer que la personnalisation des produits justifie l'évolution des organisations « classiques » du type intégrées (CIM) vers des structures plus flexibles (Holonic Manufacturing System).

## *1.3.1. Des Systèmes Intégrés de Production …*

### 1.3.1.1 Systèmes intégrés de gestion et d'exécution

Afin de permettre l'échange d'informations entre les différents processus impliqués dans la fabrication d'un produit, initialement fragmentés (niveau 1 de la Figure 6), les systèmes de production ont évolué vers des architectures intégrées basées sur l'utilisation de l'informatique. En ce sens, le paradigme CIM (Computer Integrated Manufacturing) (Ranky 1986, Kosanke 1995, Zelm *et al.* 1995) considère l'entreprise manufacturière comme étant constituée de six niveaux différents, ces derniers allant des composants du système physique de production au niveau de la gestion de l'entreprise (Pfeifer & Stöblen 1991) (ANSI/ISA-95.00.01-2000) (Figure 7). Il permet d'atteindre le niveau 3 de la métrique EICM.

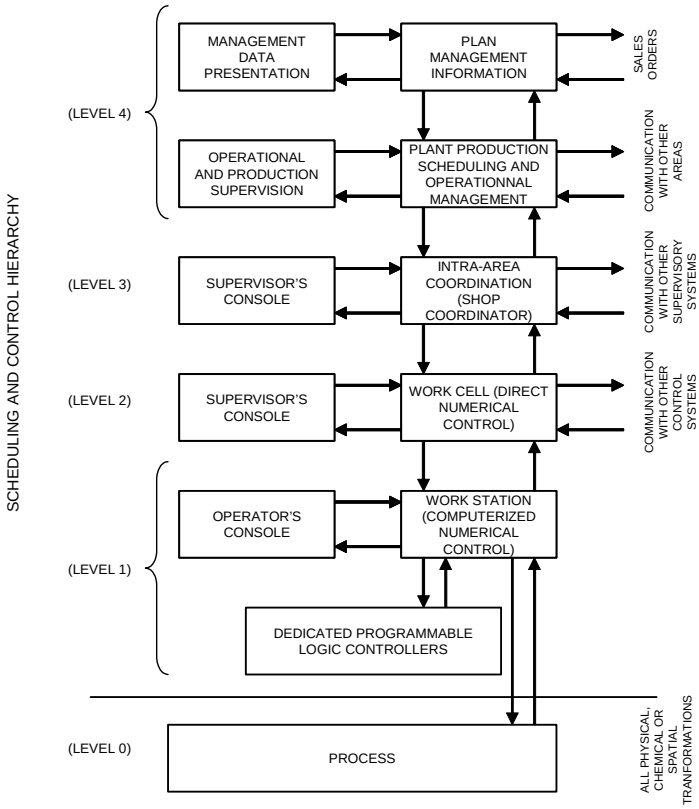



**Figure 7 : Structure hiérarchique d'un complexe manufacturier selon le CIM (d'après ANSI/ISA-95.00.01-2000)**

Si ce type d'architectures s'est révélé efficace, notamment en termes de coûts, de sûreté et de fiabilité des informations partagées, le nombre important des niveaux constitue un frein à la réactivité de la chaîne de décision si l'on tient compte des temps de traitement de l'information opérés à chacun des niveaux.

D'autre part, si ces architectures permettent le partage d'informations entre les différents acteurs de la production, la définition trop rigide de l'architecture de communications et le manque de sémantique associée aux informations ne favorisent pas la coopération entre ces processus. En ce sens, une évolution vers le niveau « Interopérable » de la métrique EICM, basée sur la formalisation des services et informations, a été engagée au niveau :

- des processus de gestion ayant notamment en charge le pilotage de la production,
- des processus d'exécution assurant la fabrication des produits.

Au niveau de l'entreprise, la formalisation des processus, et des informations qu'ils partagent, aboutit, au travers des Progiciels de Gestion Intégrés (E.R.P. : Enterprise Resource Planning), à la définition d'un référentiel « entreprise » constitué d'une base logique de données autour de laquelle s'articulent des applications paramétrées afin de répondre aux exigences de gestion de la production et de la logistique mais également de la gestion comptable, commerciale, …

Au niveau des systèmes automatisés de production, le besoin d'intégration s'est traduit, dans un premier temps, par la formalisation d'éléments de commande et de surveillance des installations industrielles (Alanche *et al.* 1986, Lhoste 94, El Khattabi 93, Combacau 1998) pour intégrer progressivement les applications de maintenance (Léger 1999). Parallèlement, ces concepts de structuration modulaire ont favorisé le développement de systèmes flexibles de production. Cette distribution de l'intelligence au plus près du terrain (Wright & Bourne 1988, Westkamper 1999) conduit à des architectures où les processus de contrôle, de commande, de surveillance et de maintenance sont répartis dans les équipements de terrain et les applications de conduite, maintenance et de gestion technique (Control, Maintenance and technical Management System (CMMS) (Morel *et al.* 1994, Neunreuther 1998, Pétin *et al.* 1998). L'interopérabilité entre ces applications, a nécessité, outre l'utilisation d'un support commun de communication tels que les réseaux industriels (Profibus, Fip, Ethernet Industriel, …), la définition des services rendus par chaque équipement et la mise en œuvre d'un protocole de coopération (Munerato 1988, Rondeau *et al*. 1995).

Ces évolutions conduisent donc à une remise à plat des architectures classiques C.I.M. ne conservant que deux niveaux relatifs aux systèmes de gestion et d'exécution. D'un point de vue technologique, l'offre actuelle conduit à deux niveaux constitués, chacun, de processus interopérables mais dont l'intégration reste faible (Figure 8).

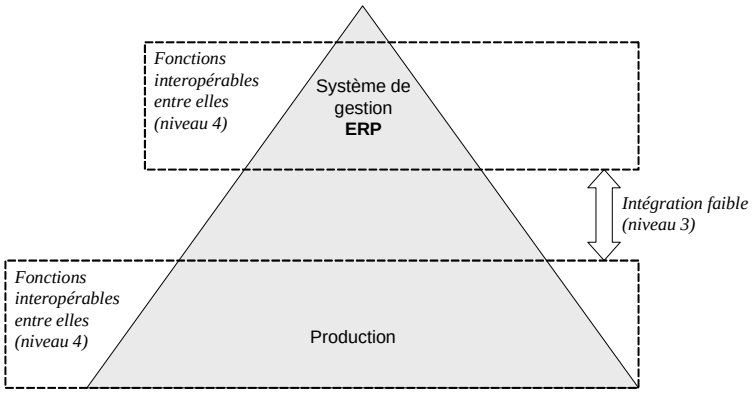



**Figure 8 : Fonctions interopérables, mais niveaux visibles**

Ce besoin d'intégration conduit à la mise en évidence d'un processus de gestion technique assurant l'interface entre le monde de la production et celui de la gestion (Despres 1991)

(Figure 9). La réponse industrielle à ce constat s'est traduite par le développement des systèmes d'exécution de la fabrication (M.E.S. : Manufacturing Execution System).

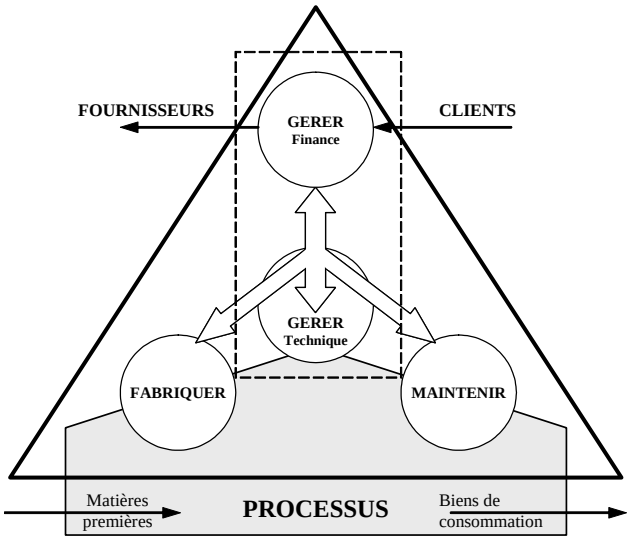



**Figure 9 : L'entreprise sous un angle de production (Despres 1991)**

### 1.3.1.2 Intégration des systèmes de gestion et d'exécution

Les systèmes d'exécution de la fabrication (M.E.S.) assurent l'intégration entre les progiciels de gestion intégrés et les systèmes automatisés par la mise en œuvre de fonctions de gestion de l'information technique et par un effort de standardisation de leurs services et systèmes d'informations respectifs.

#### 1.3.1.2.1 Fonctions des M.E.S.

L'appellation MES regroupe l'ensemble des outils assurant une partie ou la totalité des 11 fonctions des MES définies par le MESA[4] et reprises dans la norme ANSI/ISA-95 (IEC/ISO 62264) [5] suivants (le terme anglais est donné en *italique* entre parenthèses) :

- **Allocation et contrôle des ressources** (*resource allocation and control*) : cette fonction inclut la gestion des ressources directement associées au contrôle et à la fabrication (machines, outils, matériaux, documents,… et toute autre entité nécessaire aux opérations à réaliser). La gestion de ces ressources peut inclure la réservation de ressources afin de respecter les objectifs fixés par l'ordonnancement ;
- **Répartition de la production** (*dispatching production*) : gestion des flux de production sous la forme de travaux, lots et ordres de fabrication, par répartition de la production sur les équipements et de la main d'œuvre. Typiquement, l'information de répartition est présentée sous la forme d'une séquence suivant laquelle les travaux doivent être effectués, mais peut être modifiée en temps-réel en fonction de l'occurrence d'événements sur l'outil de production ;

[4] http://www.mesa.org
[5] http://www.s95.info

- **Acquisition et collecte de données** (*data collection and acquisition*) : obtention en temps réel et historisation des données opérationnelles associées aux équipements et aux procédés de production ;
- **Gestion de la qualité** (*quality management*) : mesure en temps réel sur la fabrication et analyse permettant d'assurer un contrôle correct de la qualité du produit, afin d'identifier les problèmes nécessitant une certaine attention. Elle peut recommander des actions corrigeant le problème, ou préconiser des actions et donner des résultats attendus afin d'identifier les causes de dégradation de la qualité ;
- **Gestion du procédé** (*process management*) : surveillance de la production, permettant soit de corriger automatiquement, soit de fournir une aide à la décision aux opérateurs pour corriger et améliorer les fonctions en cours d'utilisation ;
- **Planification et suivi de la production** (*production planning and tracking*) : fournit des informations sur l'état de la production et des travaux (affectation du personnel, composants utilisés dans la production, conditions de production, alarmes …). Cette fonctionnalité inclut la capacité à enregistrer les informations de production pour permettre la traçabilité des composants dans chaque produit fini ;
- **Analyse de performances** (*performance analysis*) : fournit des comptes-rendus sur les écarts constatés entre les résultats attendus et les résultats réels au niveau de la production, au niveau de l'utilisation des ressources, de leur disponibilité, du temps de cycle de chaque produit … ;
- **Opérations et ordonnancement détaillé** (*operations and detailed scheduling*) : séquencement basé sur les priorités, attributs, caractéristiques, et règles de production associées aux équipements de production et aux caractéristiques des produits, telles que la forme, la couleur ou tout autre caractéristique qui, une fois ordonnée correctement, minimise les temps de mise en place (non productifs) ;
- **Contrôle des documents** (*document control*) : contrôle des enregistrements et des documents qui doivent être conservés avec l'unité de production (instructions de travail, recettes, plans, procédures standards, morceaux de programmes …) ;
- **Gestion de la main d'œuvre** (*labour management*) : fournit le statut du personnel à la minute près, et peut interagir avec l'allocation des ressources pour déterminer les affectations optimales ;
- **Gestion de la maintenance** (*maintenance management*) : assure la disponibilité des équipements et des outils pour la fabrication, la planification de la maintenance périodique et/ou préventive ainsi que la réponse aux problèmes immédiats. Elle conserve un historique des événements et problèmes passés afin d'aider aux problèmes de diagnostic.

#### 1.3.1.2.2 Standardisation

Le principal problème posé par l'intégration des niveaux de gestion et d'exécution de la fabrication est lié à la différence des sémantiques associées aux informations par ces deux niveaux, aux échelles de temps (Figure 10) ainsi qu'aux volumes et flux d'informations traitées.

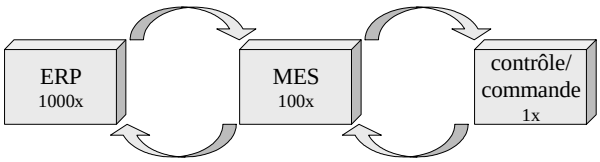



**Figure 10 : Echelles de temps des différents systèmes**

Pour pouvoir envisager une intégration entre les mondes de la gestion (« business ») et de la production (« manufacturing »), il s'avère donc indispensable d'identifier un référentiel commun qui formalise les processus mis en jeu à chacun des niveaux, les informations manipulées et les modèles utilisés. En ce sens, la norme ANSI/ISA-95 (IEC/ISO 62264), propose, dans ses parties 1 et 2 (Figure 11), une formalisation des processus de gestion et d'exécution, dans le formalisme flux de données, ainsi que les structures d'informations et leurs attributs, sous la forme de diagrammes de classes UML. La partie 3 de cette norme définit quant à elle les modèles des activités de gestion des opérations de production qui permettent l'intégration du système de l'entreprise et celui de contrôle. En d'autres termes, elle définit les fonctions des outils de type MES. Cette troisième partie est encore à ce jour en cours d'écriture et de validation.

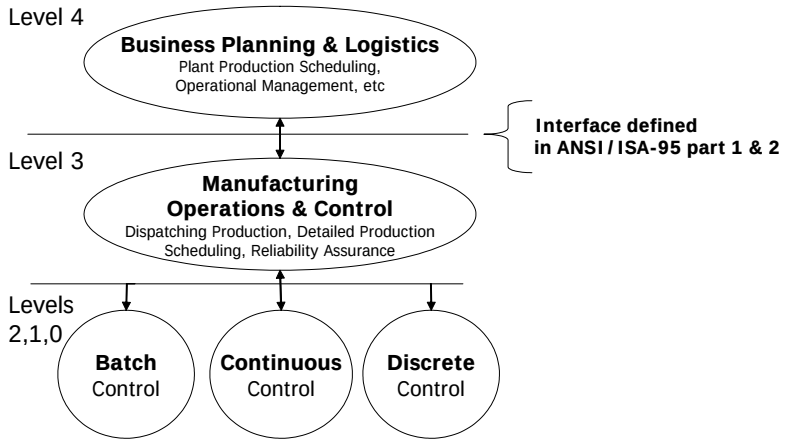



**Figure 11 : Objectif de la norme ANSI/ISA-95 : définition d'une interface entre la gestion et la production**

L'intégration suggérée est basée sur le principe d'une intégration faible, qui repose sur la définition d'un référentiel commun, les niveaux de la gestion et de la production gardant chacun leur propre système d'information.

L'articulation autour de ce système d'information neutre permet d'assurer la cohérence des informations utilisées par les onze fonctions du MES (intégration horizontale) mais également la cohérence entre les informations utilisées par les niveaux de la gestion et de l'exécution de la production (intégration verticale).

Ce référentiel introduit la définition des objets suivants (le terme anglais utilisé dans la norme est donné en *italique* entre parenthèses) :

- **Règles de production** (*production rules*) : informations utilisées pour décrire comment fabriquer un produit ;
- **Segment de processus** (*process segment*) : groupement logique de ressources (personnels et équipements) nécessaires à une étape de production, ou un processus. Un segment de processus peut être relatif à au moins un segment de produit. Il a un identifiant unique qui correspond à une opération de fabrication. Il peut inclure du personnel, de l'équipement, des matières premières et de l'énergie. D'un point de vue de la gestion de l'entreprise, il s'agit d'un processus de production ;
- **Ressource** (*resource*) : ensemble de personnels, équipements et/ou matériels ;
- **Unité de production** (*production unit*) : ensemble d'équipements de production qui convertit un stock d'entrée en produits intermédiaires ou en produits finis ;

- **Ligne de production** (*production line*) : séries d'équipements dédiés à la fabrication d'un nombre spécifique de produits ou d'une famille de produits ;
- **Cellule** (*work cell*) : groupe de machines non similaires permettant de produire une famille de produits ayant des exigences de production similaires ;
- **Capacité de production** (*production capability*) :
    - le plus haut taux de sortie qui peut être atteint pour un mélange de produits donné, des matières premières, un effort de travail, une installation ou un équipement,
    - l'ensemble des capacités des personnels, équipements, matériels et segments de processus (ce qui peut être fait avec),
    - l'ensemble des « capabilités » des installations de production. La capabilité inclut la capacité des ressources ;
- **Contrôle de la production** (*production control*) : ensemble des fonctions qui gèrent l'ensemble de la production dans un site ou une zone ;
- **Segments de produits** (*product segments*) : informations partagées entre les ressources et les règles de production pour un produit spécifique. Il s'agit d'une spécification d'un groupement logique de ressources et de matériaux (matières premières, en-cours …) nécessaires pour réaliser une étape de production, qui correspond à un ou plusieurs segments de processus ;
- **Nomenclature** (*bill of material*) : liste de tous les sous-ensembles, pièces et/ou matières premières qui sont utilisés pour la fabrication d'un produit. Cela comprend la quantité nécessaire de chacun d'entre eux ;

La norme présente également l'articulation et la structure de ces différents éléments, à l'aide de diagrammes UML. L'exemple de la Figure 12 donne le modèle de la définition d'un produit.

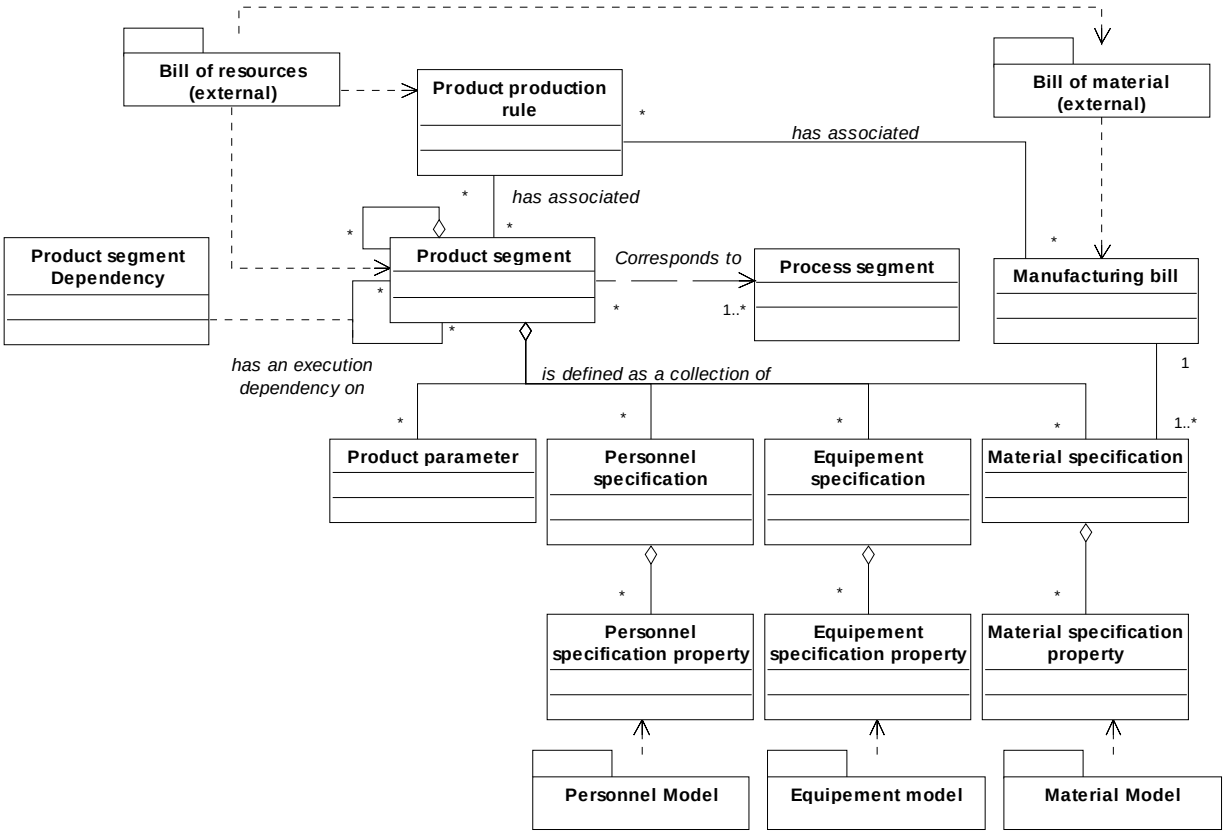



**Figure 12 : Modèle UML de la définition d'un produit d'après la norme ISA/ANSI-95.00.02**

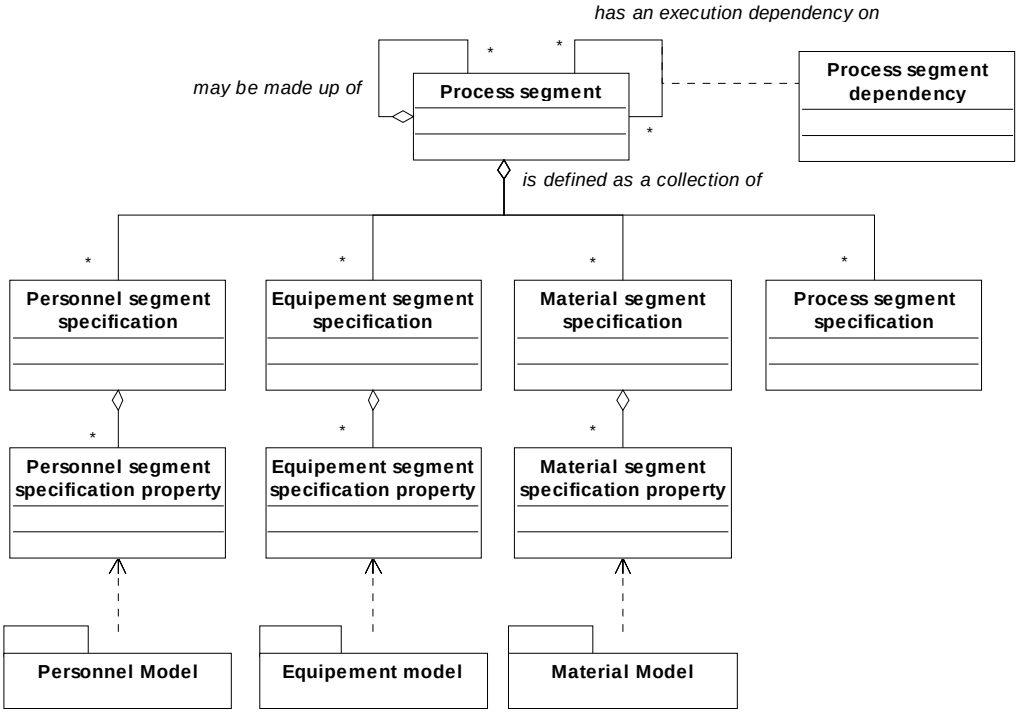



**Figure 13 : Modèle UML d'un segment de processus (*process segment*) d'après ANSI/ISA-95.00.02**

Ces différents modèles cherchent à unifier les différentes notions qui sont utilisées aux niveaux de la gestion et de la production. Cependant, certaines notions restent ambiguës, comme par exemple la différence entre la notion de *segment de produit* et celle de *segment de processus*. En effet, cette dernière, utilisée mais non définie dans la première partie de la norme ANSI/ISA-95 a été définie dans la seconde partie comme déterminant une activité de production et l'ensemble des ressources nécessaires, avec la possibilité d'inclure les matières premières, l'énergie, le personnel et les équipement nécessaires (Figure 13), sans être spécifique à un type de produit. Un segment de produit définit quant à lui quelles sont les ressources nécessaires pour réaliser un type particulier de produits, il identifie, référence ou correspond à un segment de processus, mais est identifié par le résultat du processus de transformation appliqué au type de produit.

Nous réutiliserons ces différentes notions dans la modélisation des spécifications des produits proposée au chapitre 3.

### *1.3.2. …aux Systèmes Contrôlés par le Produit*

L'intégration de l'entreprise par l'information lui permet d'atteindre le niveau « visible » de la métrique EICM (Hollocks *et al.* 1997) (Figure 6), voire « interopérable » pour certains de ses processus. Cependant, la rigidité d'une telle structure peut l'handicaper pour répondre à la personnalisation de masse de ses produits (Da Silveira *et al.* 2001). Son intégration est faite par l'information, alors que l'élément qui est central dans un système de production devant assurer une production personnalisée à grande échelle semble plutôt être le produit.

Pour cette raison, nous sommes amenés à étudier d'autres types d'architectures de systèmes de production qui confèrent au produit un rôle plus actif dans l'exécution et la gestion de sa

fabrication, ce qui favorise l'adaptabilité de son système de production (niveau 5 de la métrique EICM).

Une alternative consiste à placer le produit au cœur de ces systèmes d'entreprise comme le prône l'initiative internationale de recherche et développement IMS (Intelligent Manufacturing Systems), notamment par la proposition du paradigme HMS (Holonic Manufacturing Systems).

#### 1.3.2.1 Le concept d'Holon

##### 1.3.2.1.1 Origine

Ce concept fut introduit en 1967 par Arthur Koestler dans son livre *A ghost in the machine* (Koestler 1967) (traduit en français par *Un cheval dans la locomotive*). Le terme d'holon vient du grec *Holos*, qui veut dire « tout », et du suffixe *-on*, utilisé pour désigner une partie ou une particule, comme dans « proton ». Ce concept exprime la dualité entre le « tout » et la « partie », c'est-à-dire qu'une partie d'un ensemble peut former un tout cohérent à lui seul, mais qu'elle est également capable de communiquer et de coopérer avec son environnement. Il introduit l'idée qu'une partie des principes essentiels suffit pour exprimer la capacité qu'ont les systèmes sociaux et biologiques à s'autoréguler.

Le concept d'holon fut appliqué aux systèmes manufacturiers, notamment dans le cadre du programme IMS (Intelligent Manufacturing Systems) (Yoshikawa dans Deen 2003). Ce dernier était basé sur une coopération internationale en recherche et développement sur le thème des technologies utilisées en production. Dans ce cadre, le projet Holonic Manufacturing Systems (HMS), qui avait pour objectif de faciliter les productions à faible volume mais à haute variété dans un environnement de production agile, fut l'un des premiers initiés.

Les recherches menées dans le cadre du projet HMS avaient pour objectif :

- de rendre le système de production stable face aux perturbations,
- de rendre le système adaptable et flexible face aux changements de production,
- de permettre au système d'utiliser efficacement les ressources disponibles.

Les HMS (Matthews 1995, Christensen *et al*. 1996, Deen 2003) s'apparentent à une évolution des systèmes fractals et biologiques (Tharumarajah dans Deen 2003). Ce sont des systèmes distribués qui considèrent des holons, pouvant être des unités de production autonomes, coopérant pour fabriquer des produits dans un environnement dynamiquement reconfigurable (Bussmann & McFarlane 1999). Autrement dit, un système holonique est une combinaison d'un système hétérarchique et d'éléments centralisés (Bongaerts *et al.* 2000) (Figure 14).

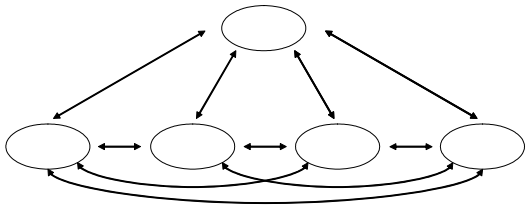


**Figure 14 : Forme d'un système holonique**

Ces unités de production sont autonomes dans la mesure où elles sont aptes à prendre des décisions localement, et être ainsi relativement tolérantes aux fautes (Fletcher & Deen 2001). Une structure holonique du système de production permet d'intégrer et de coordonner ces différents holons indépendants (Brennan et Norrie dans Deen 2003) pour satisfaire un objectif plus global.

Les holons présenteront donc deux interfaces (Caldwell & Fernandez 1998) :

- une de « haut niveau » (*up*), qui va gérer la coordination et la coopération avec les autres holons,
- une de « bas niveau » (*down*) qui va gérer les composants de l'holon.

Nous pouvons considérer chaque holon, dans un système manufacturier, comme ayant une partie physique et une partie décisionnelle, à l'image du modèle proposé par McFarlane & Bussmann (dans Deen 2003) (Figure 15).

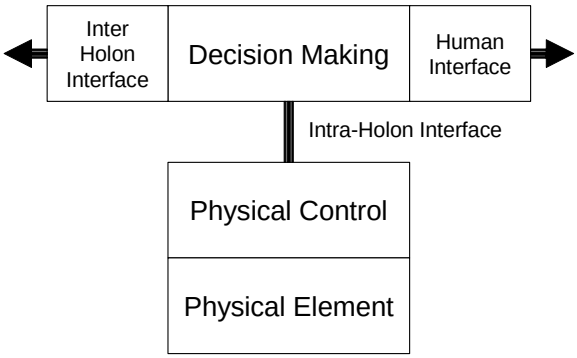



**Figure 15 : Architecture générale d'un holon selon McFarlane et Bussmann (dans Deen 2003)**

#### 1.3.2.1.2 Types d'holons

Le concept d'holon, appliqué aux Systèmes Manufacturiers Holoniques (HMS) a été décliné au niveau de tous les éléments des systèmes de production. Ainsi, les travaux de l'Université de Louvain (Belgique) font référence dans ce domaine et proposent, dans le cadre de leur architecture PROSA (Product-Resource-Order-Staff Architecture), différentes déclinaisons de base de ce concept : *Product-Holon*, *Resource-Holon* et *Order-Holon* (Van Brussel *et al.* 1998, Valckenaers *et al.* 1998). Nous traduirons en français par *Holon-Produit*, *Holon-Ressource* et *Holon-Ordre*. Voici les définitions de ces notions d'après Bongaerts (1998) (Figure 16) :

- Un **Holon-Produit** contient la connaissance nécessaire relative au produit et au procédé pour assurer la fabrication d'un produit avec une qualité correcte. Il a le rôle d'un serveur d'informations pour les autres holons du système. Il fournit des informations consistantes et à jour sur le cycle de vie du produit, les spécifications utilisateurs, sa gamme de fabrication et sa nomenclature ;
- Un **Holon-Ressource** est constitué d'une partie physique (une ressource de production du HMS), et d'une partie de traitement de l'information qui contrôle cette ressource. Il offre une capacité de production aux holons alentours. Il contient des méthodes pour allouer des ressources de production, ainsi que la connaissance et les procédures pour organiser, utiliser et contrôler les ressources pour conduire la production. Un Holon-Ressource est une abstraction pour des moyens de production tels que des machines, des outils, stocks de matières … ;

- Un **Holon-Ordre** représente un ordre de fabrication. C'est une entité active responsable de l'exécution correcte et à temps d'un travail. Il se charge explicitement des informations et du traitement des informations concernant un travail.

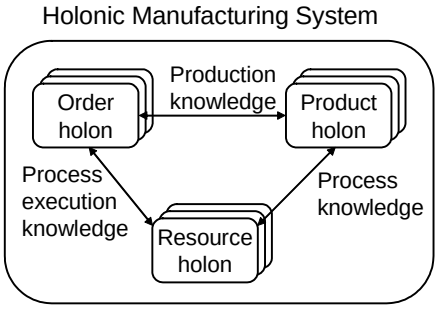



**Figure 16 : Holons de base et leurs relations, d'après (Van Brussel *et al.* 1998)**

Ces définitions ne correspondent pas directement aux définitions de *produits*, *ressources* et *ordres* qui sont classiquement utilisées en ingénierie et en fabrication. En ce sens, la définition donnée dans PROSA de l'holon-produit correspond au savoir-faire nécessaire à une classe de produits, et l'holon-ordre, à une instance d'une de ces classes de produits. Nous considérerons pour notre part dans ce manuscrit que l'holon-produit contient les informations nécessaires à sa fabrication (comme dans PROSA), mais en plus qu'il est unique, et qu'il contrôle sa propre fabrication (comme le fait l'holon-ordre dans PROSA). L'holon-ordre correspond pour nous plutôt à l'ordre de fabrication d'un ou de plusieurs produits. Dans le cas où cet ordre ne concernerait qu'un produit, il correspondrait en quelque sorte au premier état du produit, un état « virtuel ».

PROSA n'est pas le seul cadre dans lequel le concept d'holon a été interprété. Au vu des différentes notions et des différents modèles que regroupe le terme « holon », des travaux cherchent à généraliser la notion d'holon (Caldwell & Fernandez 1998). D'autres travaux ont pour leur part particularisé ce concept plus ou moins formellement, en donnant une identité particulière à leur interprétation : c'est le cas de l'Asimov-Holon de Westkämper *et al.* (1999) qui est spécialisé dans l'évitement de conflits entre holons. Ce dernier, en termes techniques, signifie qu'un robot qui aurait le comportement d'un Asimov–Holon est équipé au minimum d'un système de détection de collision, ainsi que de protection et d'évitement des collisions.

#### 1.3.2.1.3 Applications du concept d'holon

Dans les HMS, les holons sont autonomes et indépendants dans le sens où ils sont capables de prendre localement des décisions lors d'un changement ou d'une sollicitation de leur environnement, mais ils sont également coopérants dans le sens où ces décisions peuvent être prises dans un but commun à plusieurs holons (Brennan & Norrie dans Deen 2003). L'autonomie de décision de chacun des holons permet de décentraliser l'intelligence du système et d'éviter les retards et les pertes dus à une circulation d'informations sur un réseau. De plus, ils peuvent s'adapter à un changement de production, ou lors de l'apparition d'une défaillance.

La reconfigurabilité de ces systèmes est renforcée par le fait que les holons sont construits de façon modulaire, dans le sens où ils sont composés d'éléments qui sont eux-mêmes des holons. L'intérêt de la modularité a largement été démontré (Lhoste & Morel 1996) dans le

sens où elle permet de diminuer la complexité en décomposant ou en répartissant les prises de décision.

En ce sens, le concept d'holon, et donc les principes des HMS, ont été appliqués à tous les niveaux de l'entreprise, et pour assurer différentes fonctions : gestion de la production, ordonnancement, contrôle de l'atelier, contrôle des ressources de production …, voire au-delà, en considérant que l'entreprise est elle-même un holon dans un environnement devenu global grâce aux NTIC et à l'Internet (Ulieru *et al.* 2002).

Au niveau le plus haut, celui des ERP (Enterprise Resource Planning), de la gestion de la production et de l'entreprise, les holons permettent de proposer des solutions de planification flexibles (Bongaerts 1998, McFarlane & Bussmann 2000, Giebels *et al.* dans Valckenaers 2001) et des fonctionnalités d'ordonnancement (Gou *et al.* 1998, Sousa et Ramos 1998 et 1999). L'originalité de ces approches réside dans le fait que les décisions globales sont prises par les différents holons composant la structure du système. Les holons peuvent optimiser un flux de production, comme par exemple un flux de véhicules dans une usine terminale d'assemblage (Charpentier & Muhl 2004), en diminuant dans une certaine mesure les temps de calculs, ces derniers restant cependant conséquents si les modèles utilisés sont trop détaillés.

Au niveau de l'exécution de la production, celui du MES (Manufacturing Execution System), des efforts (Cheng *et al.* 2004, Gouyon *et al.* 2004-2) sont faits dans le sens du développement d'un MES holonique (HMES), c'est-à-dire un MES adapté à l'exécution de la fabrication sur un HMS. Pour l'instant, ces travaux ne donnent que des bases qui peuvent être utilisées pour la mise en place d'un MES holonique. L'intégration de ce niveau avec celui de l'entreprise (Glanzer *et al.* 2003) est un élément important, permettant d'assurer la cohérence des échanges, dans le sens de la norme ANSI/ISA-95.

Au niveau le plus bas, celui de la production, des modèles opérationnels tels que celui proposé par Neligwa & Fletcher (dans Deen 2003) permettent de conduire vers l'application du concept d'holon au contrôle de la production. Bongaerts (1998), Zhang & Norrie (1999) et McFarlane & Bussmann (2000) ont quant à eux proposé des approches aidant à la mise en place du contrôle de la production avec une utilisation des concepts holoniques. Les propriétés principales supportées par ces systèmes holoniques de contrôle correspondent à la possibilité d'être reconfigurés dynamiquement (Xu *et al.* 2000) et de s'adapter aux perturbations afin d'être tolérants aux fautes (Fletcher & Deen 2001). Dans ce sens, ils peuvent également assurer des fonctionnalités de diagnostic, comme l'ont montré Jarvis & Jarvis (dans Deen 2003).

Les recherches sur l'application du paradigme HMS ont confirmé le potentiel des systèmes décentralisés en terme de flexibilité, mais Brennan & Norrie (dans Valckenaers 2001) ont également montré qu'un degré de hiérarchie est important pour assurer une certaine performance du système de production.

Ce potentiel a été confirmé par des exemples d'implantation sur des systèmes de production réels ou simulés, et ce de plusieurs manières. Des environnements informatiques tels que celui proposé par Tamura *et al.* (dans Deen 2003) permettent de simuler le comportement d'un système composé d'holons, en proposant des mécanismes de coopération. L'implantation sur des systèmes de contrôle de haut niveau tels que des systèmes de gestion de la production, passe également par une phase de développement logiciel. Cette phase, basée sur des concepts

informatiques comme l'orienté-objet (Rannanjärvi & Heikkilä 1998), utilise souvent la technologie et les principes des systèmes multi-agents introduits par Ferber (1995) (Bussmann 1998, Fischer 1999, Oliveira *et al.* 1999, Heikkila et al. dans Valckenaers 2001, Kádar et Monostori 2001, Mařik *et al.* dans Deen 2003, Marik 2004). Brennan *et al.* (2003) intègrent en plus des interfaces permettant des échanges temps-réel. Les systèmes multi-agents constituent une technologie permettant d'implanter le concept d'holon.

Des implantations sur des installations de production réelles, avec une partie physique, telles qu'un système d'assemblage holonique (Arai *et al.* dans Valckenaers 2001) (McFarlane *et al.* dans Morel et Grabot 2003) ou un système de grenaillage (Heikkilä dans Deen 2003), permettent de valider les concepts développés. Ces implémentations restent d'une complexité relativement faible, mais permettent néanmoins de donner une bonne appréciation des possibilités offertes en terme de flexibilité et de stabilité des systèmes holoniques face à des perturbations.

#### 1.3.2.2 Systèmes contrôlés par le produit

Une utilisation du concept d'holon-produit consiste, dans un premier temps, à embarquer sur le produit lui-même les informations concernant sa fabrication pour assurer la cohérence entre les flux de produits physiques et les flux d'informations (flux de biens et de services) comme cela est fait par Pereyrol (1993) ou dans le cadre des « objets nomades de production » (Chaxel 1995). Dans ce contexte, les machines ont pour rôle de *savoir faire* et le produit celui de *savoir faire faire*. Le produit possède donc le *quoi*, comme sa gamme de fabrication, et les ressources le *comment*, c'est-à-dire la procédure à employer pour réaliser les opérations spécifiées dans la gamme du produit. En ce sens, le produit est intégré à la boucle de contrôle de la production (Figure 17) comme le proposent McFarlane *et al.* (2002).

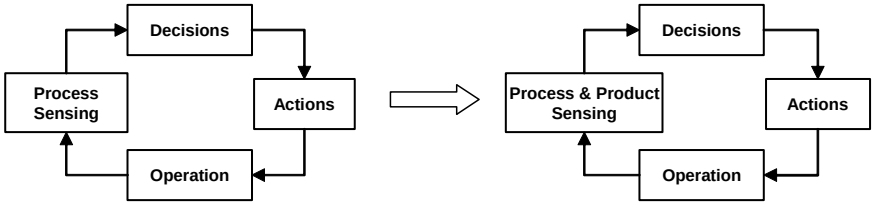



**Figure 17 : Du contrôle par les processus au contrôle par le produit (McFarlane *et al.* 2002)**

Dans un deuxième temps, si l'on considère que l'intelligence et la prise de décision doivent être distribuées à l'extrême (poste de travail, ressources de transport, produits …), le produit, peut être rendu « intelligent » (Kärkkäinen *et al.* 2003) pour devenir le conducteur ainsi que le support du suivi de sa propre fabrication. En d'autres termes, le produit devient capable de contrôler son évolution (Figure 18), de dire dans quel état il se trouve et de collaborer avec son environnement, à l'image du concept d' « holon produit ». Le système est alors qualifié de « système contrôlé par le produit ».

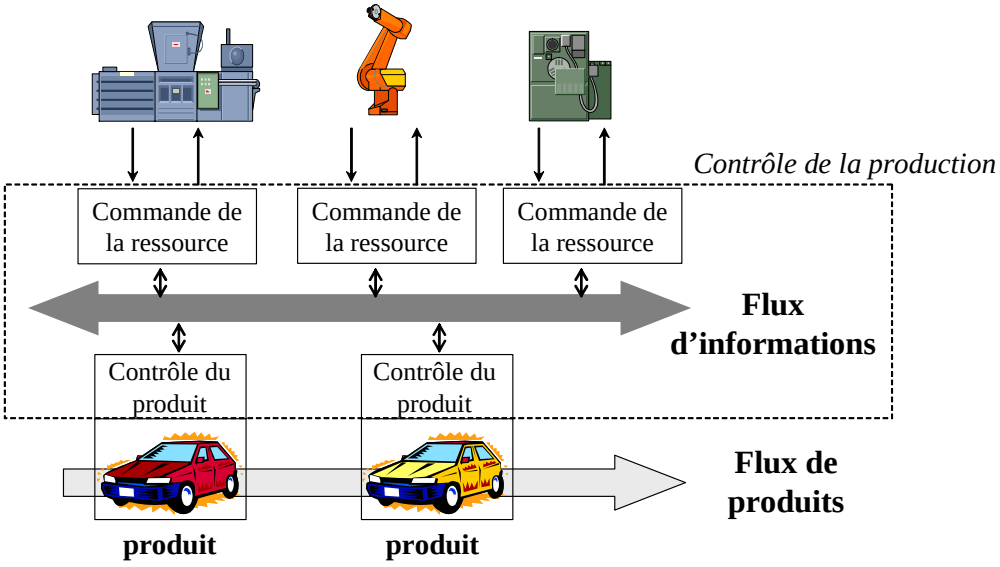



**Figure 18 : Scénario illustrant un contrôle de la production par le produit**

Les holons, et notamment les holons-produits, ont la particularité d'être des entités indépendantes dans le sens où ils forment conceptuellement un « tout » cohérent. Ils ont une partie physique et une partie décisionnelle. Cette dernière leur permet d'une part d'avoir une représentation informationnelle d'eux-mêmes et d'autre part de prendre localement des décisions les concernant.

Ces holons-produits embarquent l'information les concernant. En ce sens, à tout moment il y a un lien entre les produits physiques qui circulent et les informations qui s'y rapportent. De cette manière, il y a cohérence entre les flux physiques et informationnels. Dans l'hypothèse où chaque produit est observable en permanence, il est possible de connaître sa situation actuelle à tout instant, par un simple relevé des informations qu'il transporte.

Si l'on projette dans le temps, le produit peut stocker les différents états par lesquels il est passé. Ainsi, il contient les informations relatives aux différentes étapes de sa fabrication, à ses différents composants … en d'autres termes, en mémorisant la suite de ces images informationnelles, ainsi que celles des composants des produits, il est possible d'assurer la traçabilité de chaque instance de produit.

D'un point de vue industriel, assurer la traçabilité est devenu une nécessité, d'une part pour des exigences de qualité et de détection des défauts éventuels, mais également pour permettre la généalogie de chaque produit. Dans le cadre d'une production dans laquelle chaque produit est différent, le suivi est d'autant plus compliqué. En ce sens, le transport et le stockage des informations par le produit permettent de répondre à cette problématique.

Si le concept d'holon-produit semble répondre au problème de la traçabilité, il n'en est pas pour autant directement implantable. En effet, pour pouvoir l'implanter directement, il faudrait pouvoir embarquer une capacité de mémorisation, de prise de décision et de communication sur chaque produit. Si dans le cas d'une production de produits à forte valeur ajoutée, le prix d'un tel dispositif peut être négligeable, il n'en est pas toujours ainsi. Sur des produits dont le prix est plus faible, le dispositif permettant d'assurer la mémorisation des informations relatives à la fabrication d'un produit peut s'avérer plus coûteux que le produit

lui-même. En ce sens, il est difficilement envisageable d'utiliser directement le concept d'holon-produit.

Ainsi, il est possible de « dégrader » ou plus exactement de projeter le concept d'holon-produit lors de l'implantation à l'aide de techniques d'Identification Automatique (Auto-ID[6]) (McFarlane *et al.* dans Morel & Grabot 2003, García *et al*. 2003). L'Auto-ID consiste en l'identification de chaque produit de manière unique. En utilisant ce principe, et en déportant physiquement les capacités de mémorisation, de communication et de prise de décision sur des systèmes externes aux produits (automates programmables, bases de données …), il est possible d'assurer le suivi et le contrôle de chaque instance de produit.

Technologiquement, le lien entre le produit et les informations le concernant peut être réalisé à l'aide d'un code EPC (Electronic Product Code[7]) (Brock 2002) implanté dans une puce (ou « tag ») embarquée sur le produit. Ces puces utilisent la technologie d'Identification par Radio Fréquences (RFID) (Petit 2003) pour transmettre leur identifiant aux ressources de production, par le biais de lecteurs adaptés. Ces techniques ont pour but de permettre un meilleur suivi des produits par une identification sans contact, et sans contraintes physiques d'observabilité. Cependant, les antennes de ces systèmes d'identification par radio fréquences ont une portée limitée. Il est donc nécessaire de prévoir des antennes suffisamment puissantes ou placées stratégiquement afin d'assurer une observabilité de chaque produit à chaque instant.

Ainsi, il est possible à tout moment, en liant une base de données contenant l'ensemble des opérations faites sur chaque produit à l'identifiant du produit, de connaître l'ensemble des opérations qu'il a subies, et quelles sont celles qui restent à faire pour terminer sa fabrication. Cette technologie doit donc permettre de mettre en application le principe du contrôle par le produit.

D'un point de vue applicatif, des exemples montrent l'intérêt de l'utilisation de l'Auto-ID. Par exemple, dans le cas d'une cellule flexible d'assemblage sur laquelle chaque produit porte un identifiant (McFarlane *et al*. dans Morel et Grabot 2003), il est possible de connaître quel est chacun des composants d'un produit final assemblé. Dans cet exemple, il est également possible de repérer qu'un produit d'un certain type n'est pas dans le bon magasin. Le robot assurant la mise en place des composants est capable de lire l'identifiant de chaque composant, et, en interrogeant une base de données, est capable de vérifier qu'il assemble le bon composant sur le bon produit. Il est également capable de ranger à sa place un produit qui aurait été déplacé, et qui ne serait plus dans le magasin approprié.

#### 1.3.2.3 Conclusion

Nous venons de voir que les HMS présentent des caractéristiques intéressantes pour assurer une plus grande flexibilité de la production. Ces holons peuvent être utilisés *a priori* pour structurer le système de production lors de sa conception, ou *a posteriori* comme l'ont fait Charpentier & Muhl (2004) (holonification) pour repenser l'organisation d'un système existant. Il est également possible de concevoir un système de façon holonique, puis de « dégrader » ou adapter cette solution lors de son application sur le système réel déjà existant.

[6] http://www.autoidlabs.org
[7] http://www.epcglobalinc.org

## *1.4. Situation de travail : l'Atelier Inter-établissements de Productique Lorrain*

Ce cadre applicatif sera utilisé tout au long de ce manuscrit pour illustrer notre propos. Nous allons essayer dans un premier temps de voir, par la mise en place d'outils de gestion et de suivi de production sur un exemple concret, dans quelle mesure ces outils de type intégrés sont capables de prendre en compte une production de type personnalisation de masse.

### *1.4.1. Présentation de l'AIP*

Le pôle AIP-PRIMECA Lorraine est un centre de ressources régional utilisé comme support expérimental de formations approfondies dans le domaine de la Productique et de la conception intégrée en mécanique. Il est constitué de deux sites, l'un à Villers-lès-Nancy sur le campus Victor Grignard (Faculté des Sciences et Techniques de l'Université Henri Poincaré - Nancy 1) et l'autre à Metz dans les locaux de l'École Nationale Supérieure des Arts et Métiers. Nous allons ici nous intéresser plus particulièrement au site de Villers-lès-Nancy, en le considérant comme une entreprise manufacturière à part entière, fabriquant des produits de type « AIP ».

#### 1.4.1.1 Présentation du site et des équipements

Le site de production principal est composé d'un atelier central, d'un sous sol et de différentes salles. Les équipements de production disponibles à l'AIP sont :

- une scie mécanisée Ultra (au sous sol),
- un tour à Commande Numérique Rosilio TB540 (dans l'atelier),
- un Centre d'Usinage à Commande Numérique Graffenstaden CU60 (dans l'atelier),
- une Cellule Flexible d'Assemblage (dans la salle 111), aussi appelée Système Flexible de Production (SFP) ().

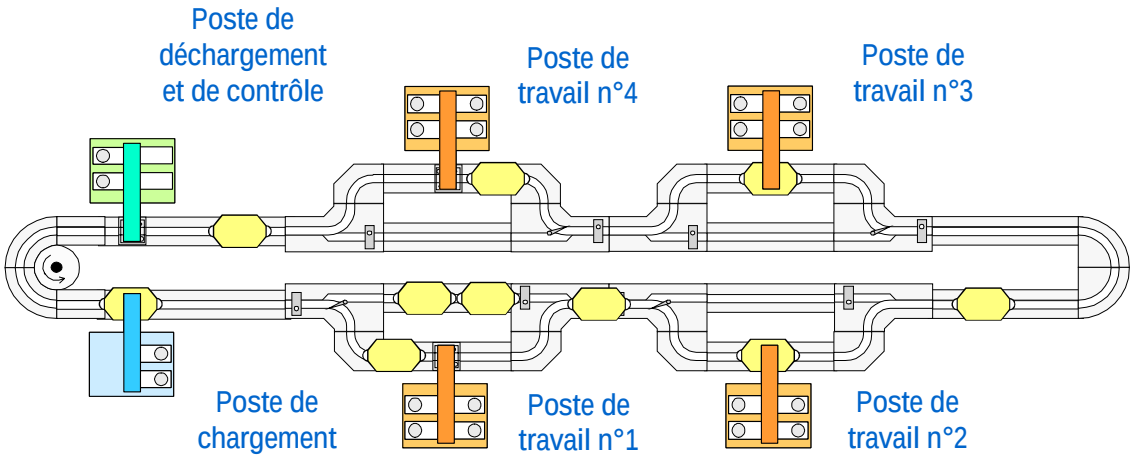



**Figure 19 : Cellule Flexible d'Assemblage**

Certaines opérations de production nécessitant un découpage à la presse dans des plaques de tôle sont faites à l'IUT Nancy Brabois, voisin de l'AIP. Nous considérerons dans notre étude l'IUT comme un site déporté, ayant pour équipement une presse hydraulique.

L'AIP dispose également de différents types d'outils d'ingénierie : CAO, FAO, Ingénierie d'Automatisation …

### 1.4.1.2 Présentation des matières premières, des en-cours et des produits

Les produits de type AIP fabriqués sont relativement simples, mais permettent tout de même de mettre en œuvre tous les équipements disponibles. Il s'agit d'assemblages de 2 à 4 pièces de forme cylindrique, de différents types (Figure 20).

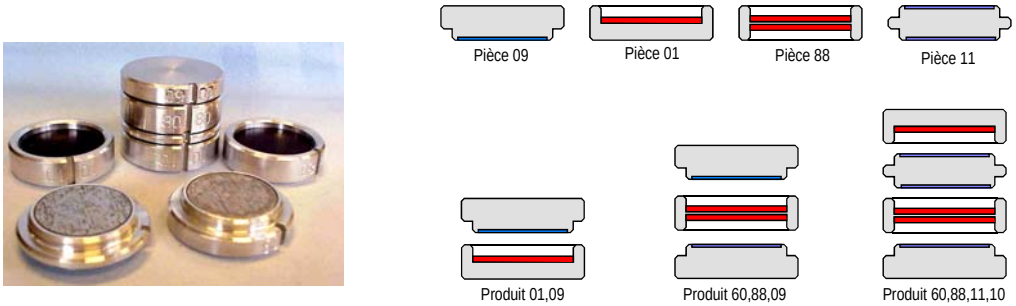



**Figure 20 : Exemples de pièces et de produits de type AIP**

Ces produits sont fabriqués à partir de barres en aluminium de 3 mètres de long, et de plaques de tôle aimantée ou en acier galvanisé.

Différents en-cours de fabrications sont produits :

- des lopins (barres d'aluminium d'environ 1 m de long),
- des disques de tôle aimantée ou d'acier galvanisé,
- des palets d'aluminium,
- des pièces.

### 1.4.1.3 Présentation du procédé de fabrication des produits

Les différentes étapes de fabrication des produits assemblés de type AIP sont (Figure 21) :

- tronçonnage des barres brutes en lopins avec une scie mécanisée,
- tournage des palets dans les lopins avec un tour à commande numérique,
- découpe des disques dans les tôles à l'IUT avec une presse hydraulique,
- collage des disques dans sur les palets pour obtenir des pièces,
- assemblage des produits AIP à partir des pièces sur un Système Flexible de Production.

Ces étapes ne prennent pas en compte le fait que le découpage et le collage des disques sont faits à l'IUT. Il s'agit d'une hypothèse simplificatrice qui permet d'éviter la question du transport et du stockage inter sites.

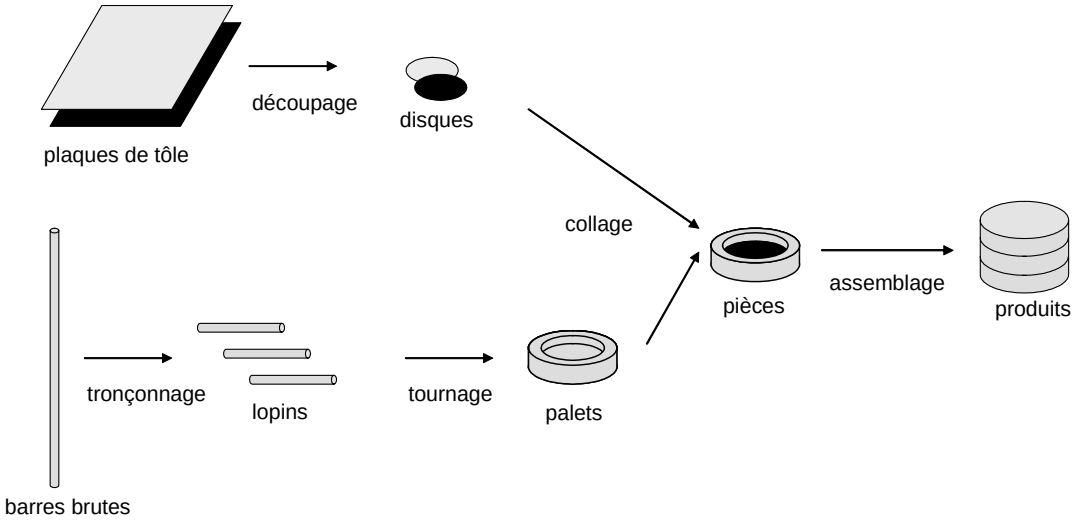



**Figure 21 : Procédé de fabrication des produits AIP**

### 1.4.1.4 Présentation de la structure des systèmes d'informations mis en place

Nous avons dit plus haut que nous considérions l'AIP comme une entreprise de production à part entière. Elle sera donc organisée autour de systèmes d'informations et de contrôle/commande que nous mettons en place, à tous les niveaux de sa structure (Figure 22) :

- Enterprise Resource Planning (niveau 4 de la norme ANSI/ISA-95) : l'ERP que nous mettons en place est Adonix X3 ; il est principalement destiné aux PME/PMI,
- Manufacturing Execution System (niveau 3 de la norme ANSI/ISA-95) : le MES que nous mettons en place est Wonderware InTrack ; l'AIP dispose également d'un outil d'ordonnancement (Incoplan) et d'un outil de GMAO (Empacix),
- la supervision est assurée par Wonderware InTouch sur le Système Flexible de Production,
- le contrôle/commande est assuré par des commandes numériques NUM, des automates programmables Siemens programmés à l'aide de l'atelier Step7 …

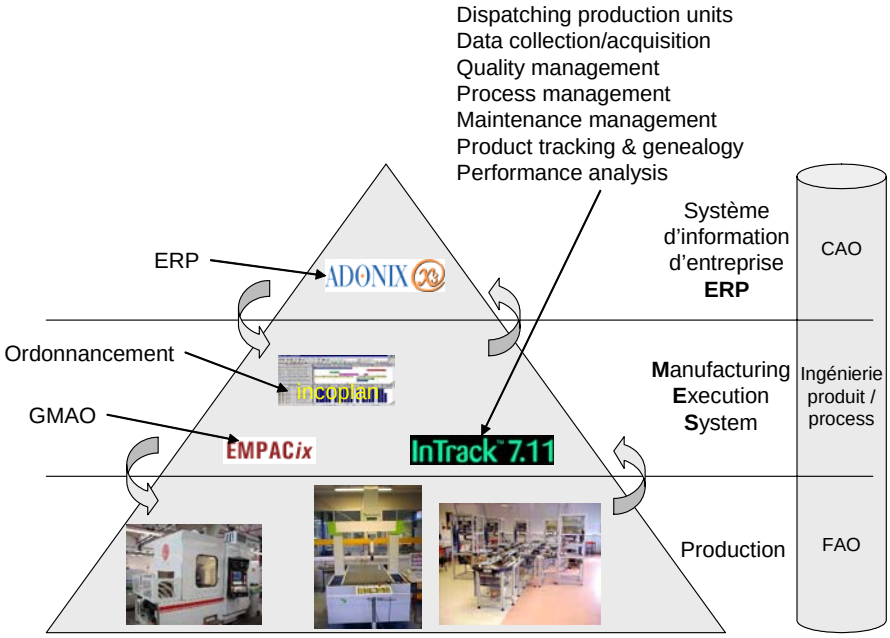



**Figure 22 : Structure des systèmes d'information à mettre en place sur l'AIP**

## *1.4.2. Personnalisation des produits à l'AIP*

Les produits fabriqués à l'AIP peuvent être personnalisés de diverses façons. Le première, consiste à modifier les pièces qui vont être assemblées. Il est possible en effet lors du tournage de personnaliser les pièces, en inscrivant, par exemple, le nom du client sur le coté, ou en collant un disque aimanté à la place d'un disque en acier galvanisé.

La seconde consiste en la définition de nouveaux assemblages à partir des pièces déjà existantes. Dans la mesure où tous les types de produits possibles avec les pièces existantes n'ont pas été référencés, il est possible de commander par exemple un produit personnalisé composé d'une pièce de type 01 et d'une de type 11.

La troisième possibilité de personnalisation mêle les deux précédentes, et consiste en l'assemblage personnalisé de pièces personnalisées.

Ces personnalisations ont bien évidemment un impact sur les outils mis en place à l'AIP, qui n'ont pas été prévus pour ce type de production « à la demande ». L'automatisation des machines devra être flexible, et le suivi des produits individualisé afin d'assurer la fabrication et la traçabilité.

### 1.4.2.1 Impact sur l'automatisation du système de production

Comme nous l'avons vu plus haut, définir un programme de commande revient, en d'autres termes, à résoudre le paradigme d'automatisation, formalisé par Fusaoka *et al.* (1983) sous la forme :

$$\textit{Dynamics} \wedge \textit{Unknown Control Rules} \supset \textit{Goal}$$

Au niveau de l'automatisation de la commande des processus de fabrication, il va falloir redéfinir des nouveaux programmes permettant de prendre en compte les opérations de fabrication qui n'étaient pas prévues dans la commande d'origine, et donc résoudre à chaque fois cette équation. En effet, même si les postes de production sont flexibles, cette flexibilité se limite souvent à un choix de poste ou un choix d'opérations qu'ils sont capables de faire, et qui ont été définies au préalable. Ceci implique une intervention des automaticiens et de l'ingénierie produit/processus pour un redéveloppement partiel, ou complet, des programmes de contrôle/commande des processus de production en cas de nouvelle production.

### 1.4.2.2 Impact sur les systèmes de gestion

Les outils de gestion de production tels que sont les MES et ERP, se basent entre autres sur les notions de nomenclatures, de routes de fabrication et/ou de gamme.

Dans les ERP, comme par exemple Adonix X3, ces informations sont nécessaires au lancement des différents calculs de besoins nets, des temps nécessaires, des charges machines, des coûts, du plan directeur de production … Elles doivent donc être saisies pour chaque type de produit (Figure 23).

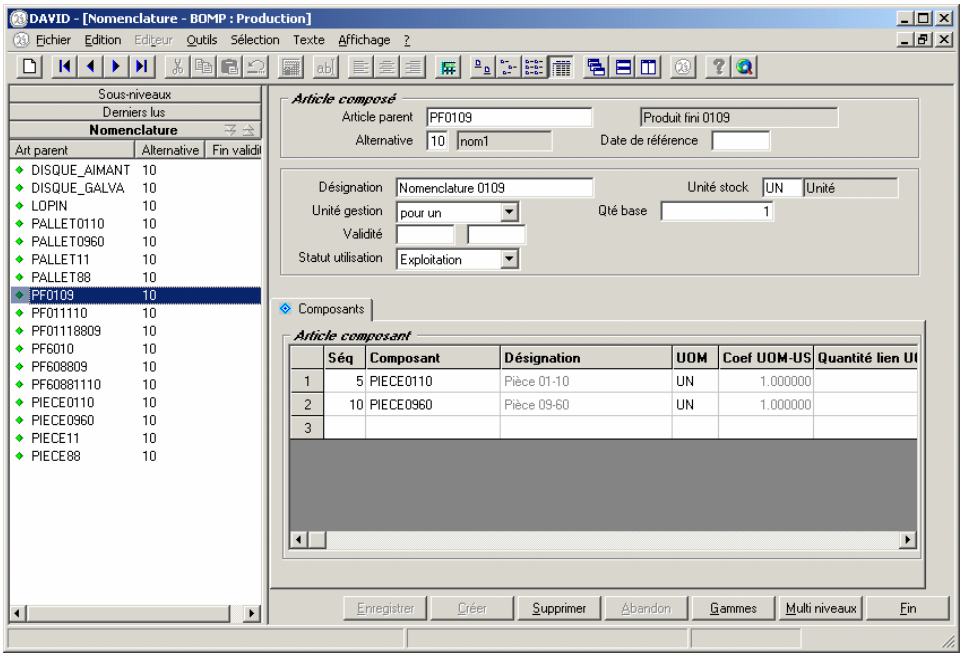



**Figure 23 : Saisie de la nomenclature sous l'ERP X3**

Dans les MES, comme par exemple Wonderware InTrack, plutôt spécialisé dans le suivi de la production, la définition de la nomenclature ainsi que les routes de fabrications de chaque type de produit sont nécessaires. Elles permettent d'indiquer aux ouvriers quelle est l'opération de production suivante pour chaque lot de produits (ou chaque produit dans le cas de lots unitaires), et quelles sont les informations qui doivent être saisies pour assurer le suivi. La définition de ces routes de fabrication et de la nomenclature se fait « hors-ligne », par un configurateur (Figure 24). Il est impossible à un utilisateur quelconque (qui n'est pas l'administrateur du progiciel) de créer ou de modifier une route de fabrication.

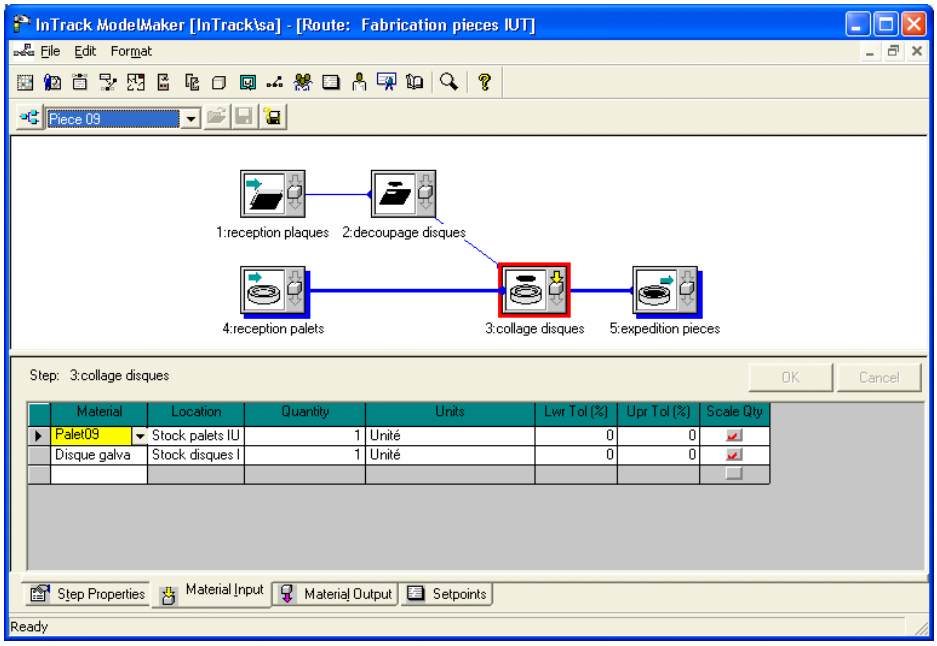



**Figure 24 : Création et configuration d'une route de fabrication dans le MES InTrack**

Ces outils sont donc d'une utilisation trop statique ou figée pour une utilisation dans le cadre d'une production « à la demande » ou de type « personnalisation de masse ».

### *1.4.3. Conclusion sur le cadre de travail de l'AIPL*

Cet exemple de l'AIPL, qui nous a servi de support dans ce paragraphe pour montrer les limites d'une architecture de type intégrée, sera à nouveau utilisé pour montrer la faisabilité du contrôle par le produit. Notre objectif est de répondre à certaines limites que nous venons de mettre en évidence, en utilisant des concepts issus des HMS, et en les appliquant avec certaines adaptations sur ce système de production architecturé autour d'une structure intégrée de type ERP/MES/Contrôle de la production.

## *1.5. Conclusion*

Nous venons de voir que les industriels ont désormais à traiter le problème de la personnalisation à grande échelle des produits manufacturés. Nous avons mis en évidence que ce type de marché à forte variabilité des produits impose des contraintes en terme de flexibilité et de reconfigurabilité du système de production, et impose également la traçabilité de chaque produit.

Ainsi, il devient nécessaire :

- de chercher à évoluer du niveau *visible* au niveau *interopérable*, voire au niveau *adaptable* de la métrique EICM (Hollocks *et al*. 1997) (Figure 6), niveau dans lequel les systèmes de production sont flexibles, mais également capables de s'auto-organiser pour répondre rapidement aux changement de la production ; ainsi, nous pourrons assurer la contrôlabilité de chaque instance de produit ;
- de suivre chaque instance de produit, et non plus chaque lot, afin d'assurer la traçabilité et la généalogie individuelle de chaque produit ; de cette manière, nous assurerons l'observabilité des produits.

Nous avons montré qu'une architecture de contrôle par le produit conférant à ce dernier un rôle actif dans la gestion et l'exécution de sa fabrication doit permettre de répondre à ces différents points.

Ces organisations ont un impact important sur les processus d'ingénierie conduisant à leur mise en œuvre dans la mesure où l'automatisation doit intégrer les spécifications classiques du contrôle des équipements industriels, mais également les caractéristiques liées aux spécificités des produits. Les méthodes et modèles applicables à une telle ingénierie produit/processus font l'objet du chapitre suivant.

# *Chapitre 2*

## Ingénierie des systèmes contrôlés par le produit

# Chapitre 2 : Ingénierie des systèmes contrôlés par le produit

## *2.1. Introduction*

Ce chapitre a pour objet de montrer la pertinence des techniques de synthèse formelle de la commande pour l'automatisation des systèmes contrôlés par le produit.

Ce constat est élaboré à partir d'une analyse des travaux effectués par la communauté scientifique autour des HMS qui proposent des architectures de référence dans lesquelles s'inscrit la modélisation des systèmes contrôlés par le produit, sans toutefois présenter de méthode d'automatisation permettant de distribuer le contrôle dans le produit, et sans tenir compte des standards industriels en vigueur comme la norme ANSI/ISA-95 qui faciliteraient leur mise en place sur une installation industrielle.

En ce sens, nous montrons comment il est possible de tirer parti des travaux relatifs à la structuration de la commande pour poser les bases d'une ingénierie d'automatisation produit/processus conforme aux systèmes industriels et permettant d'élaborer d'une part les règles de commande des différents équipements du système, et d'autre part les règles personnalisées de contrôle embarquées dans les produits.

La définition de ces dernières devant être obtenue « en ligne » pour maîtriser la variabilité des produits, l'utilisation des techniques de synthèse formelle s'avère pertinente dans la mesure où elles permettent une génération automatique d'une commande sûre de fonctionnement.

## *2.2. Cadres de modélisation des Systèmes Contrôlés par le Produit*

Afin de situer les différents travaux de la communauté scientifique sur la modélisation des HMS, nous ferons référence au cadre de modélisation GERAM issu de la norme ISO WD 15704 (Figure 25) qui permet de fédérer les différents éléments de la modélisation.

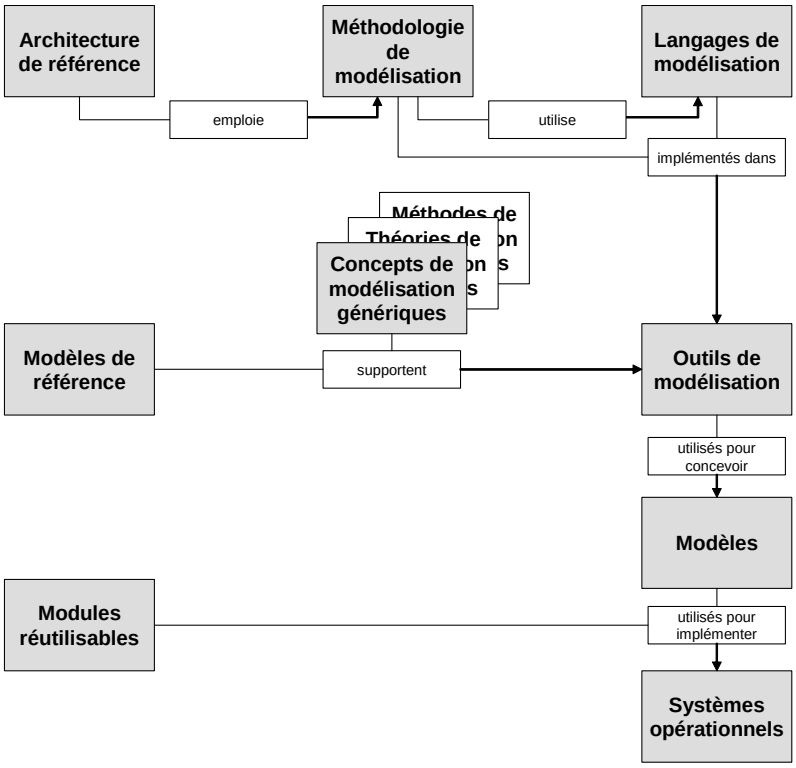



**Figure 25 : Cadre de modélisation GERAM (ISO 1998)**

Les **concepts génériques de modélisation**, ont pour objet de guider plus précisément l'utilisateur dans sa démarche de modélisation à partir de concepts et de définitions génériques. En ce qui concerne les HMS, le concept générique de base est l'holon, défini par Koestler (1967), que nous avons présenté au chapitre précédent.

Une **architecture de référence** d'un modèle de HMS constitue une abstraction d'une architecture générique qui donne les éléments nécessaires pour modéliser et structurer les systèmes manufacturiers selon les concepts des HMS. Son but est de structurer la conception des architectures de systèmes spécifiques en définissant une terminologie unifiée, les types de composants du système, leurs responsabilités, leurs dépendances, leurs interfaces, leurs interactions, leurs contraintes, les règles de conception, et de fournir des modèles pour représenter tous ces aspects.

Les architectures de référence des systèmes de production holoniques, dont les principaux objectifs sont de rendre les systèmes reconfigurables (Fletcher *et al.* 2003) et d'en augmenter la flexibilité (Zhang *et al.* 2003), se basent sur le concept générique d'holon. Parmi les plus répandues nous pouvons noter l'architecture ADACOR dont une méthodologie de modélisation est présentée par Leitão & Restivo (2003), et qui permet une spécification formelle des systèmes holoniques (Leitão *et al.* 2003), mais surtout l'architecture logicielle PROSA (Valckenaers *et al.* 1998, Van Brussel *et al.* 1998, Hermans *et al.* 1999, Wyns 1999) développée à l'Université Catholique de Louvain en Belgique.

Cette dernière définit principalement une architecture inter-holon, identifiant les types d'holons, leurs responsabilités, et la façon dont ils interagissent. Elle est constituée de trois types d'holons de base : holon-ordre, holon-produit et holon-ressource, dans lesquels les données et les traitements de la production sont distribués (Figure 26).

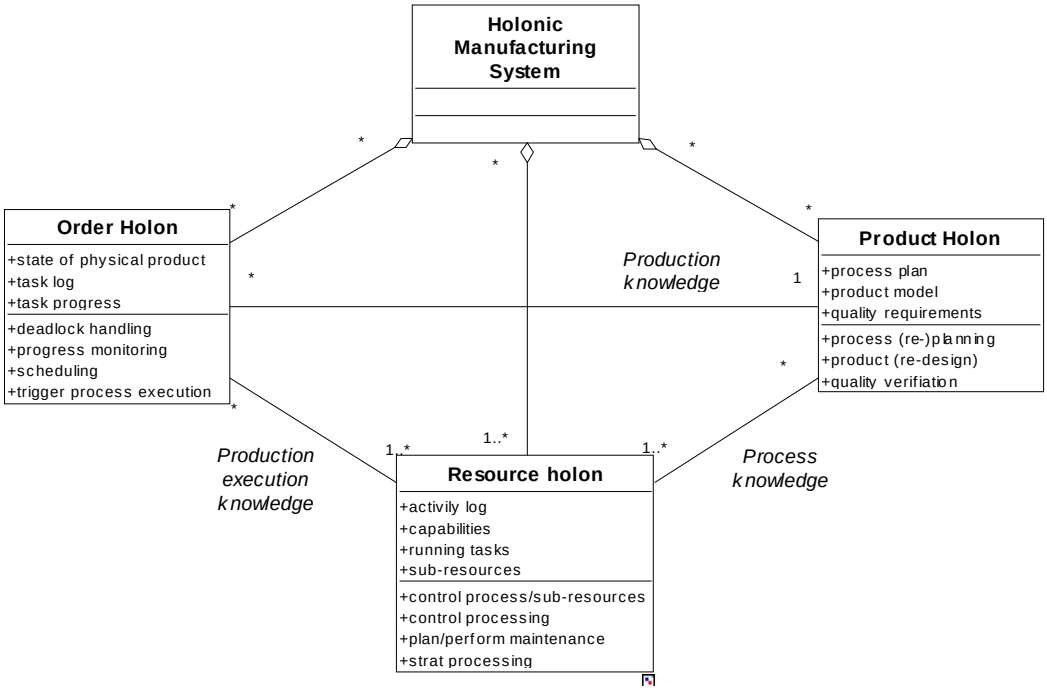



**Figure 26 : Répartition des données et des traitements dans les holons de base de PROSA (Van Brussel *et al.* 1998)**

Ces architectures permettent de structurer les HMS selon des principes orientés objets, comme l'agrégation (Valckenaers *et al.* 1998) (Figure 27) ou la spécialisation. Les holons agrégés sont définis comme étant un ensemble d'holons qui sont groupés pour former un holon de taille supérieure ayant une identité propre, formant ainsi une hiérarchie d'agrégation. En fonction du point de vue de l'observateur ou du modélisateur, les holons agrégés sont traités comme un seul élément, ou alors divisés en leurs composants.

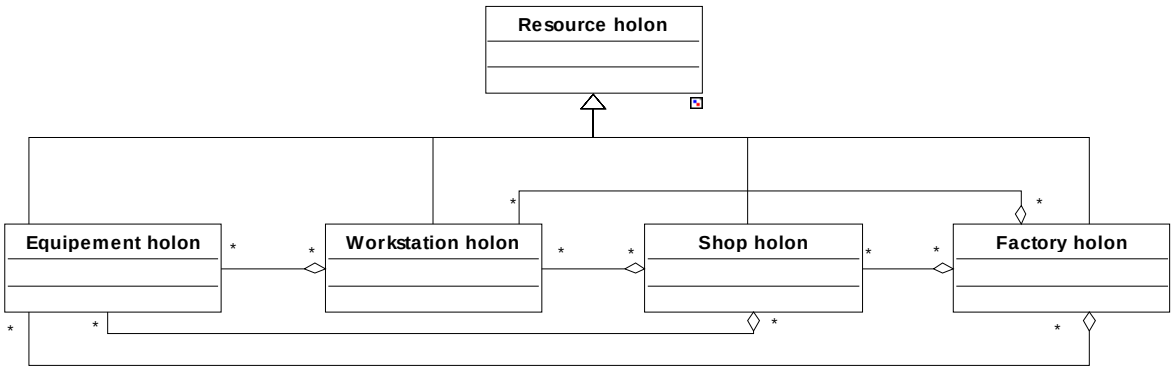



**Figure 27 : Agrégation d'holons-ressources d'après Valckenaers *et al.* (1998)**

Les **modèles de référence** ont pour objet d'aider l'utilisateur dans la définition des modèles tout en respectant au mieux des connaissances « métier ». En ce sens, si les architectures de référence définissent principalement la structure des différents composants des HMS, des modèles de référence s'intéressent pour leur part à des mécanismes d'interaction, comme par exemple, dans le cadre de l'ordonnancement, des modèles de négociation (Figure 28) (Bongaerts 1998). Ces modèles de référence montrent comment interagissent les différents holons, en faisant apparaître des mécanismes de requêtes / réponses.

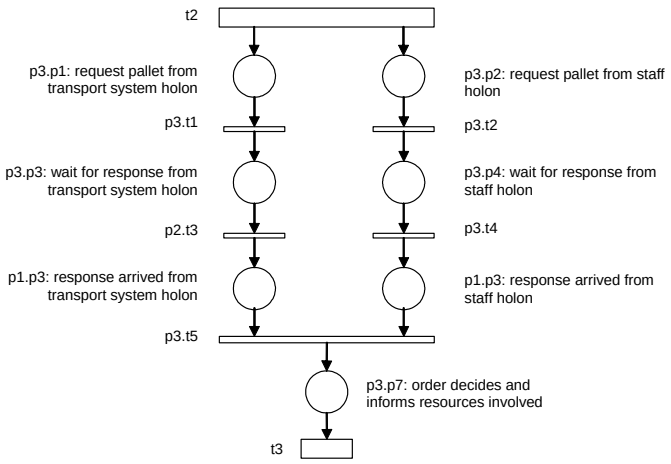



**Figure 28 : Interaction entre deux holons pour de l'ordonnancement (Bongaerts 1998)**

Les modèles de références portent également sur les structures de données permettant la mise en place des HMS, en proposant, à l'image de Chaxel *et al.* (2003), le modèle conceptuel des données embarquées dans les holons produits.

Les **langages de modélisation** ont pour objet de formaliser les modèles au sein de l'architecture de référence tout en respectant, au mieux, l'interprétation des connaissances « métier ». Dans le cadre des HMS, qui sont structurés à l'aide de principes de l' « orienté-objet », les aspects statiques ainsi que les échanges entre les différents holons sont souvent modélisés à l'aide d'UML. A l'image des travaux de Sousa et Ramos (1999) et Huang *et al.* (2002) qui proposent un protocole de négociation permettant l'ordonnancement ou de ceux de Hermans *et al.* (1999) qui proposent un mécanisme de choix, les échanges entre les holons peuvent être modélisés, en plus des réseaux de Petri (Figure 28), à l'aide de diagrammes de collaboration UML. Heikkilä *et al.* (dans Deen 2003) utilisent de même les diagrammes de séquences et d'activités pour formaliser les échanges entre les différents robots qui composent leur système holonique.

Les aspects dynamiques des HMS, tels que les comportements des ressources ou des produits, ne sont que très peu évoqués dans la littérature. Cependant, il est possible de modéliser le comportement interne des holons à l'aide de réseaux de Petri (Leitão *et al.* 2003) ou d'automates à états finis (Cassandras & Lafortune 1999) (Kruth *et al.* dans Valckenaers 2001). Ces modèles ont l'avantage d'être utilisables dans les outils de model-checking (pour vérifier des propriétés telles que la vivacité ou le non-blocage) et de simulation pour vérifier que le comportement modélisé est bien celui attendu.

Ces formalismes permettent de représenter principalement les aspects statiques et structurels des HMS. Cependant, pour assurer que le système de contrôle sera cohérent avec les procédés physiques de transformation, il est nécessaire que la structure de contrôle ne repose pas que sur le savoir faire de l'automaticien, mais également sur celui de l'ingénierie produit/processus. Malgré cela, les processus de transformation des holons-produits ne sont pas souvent étudiés dans la littérature sur les HMS, alors qu'il existe des formalismes et même des outils, à l'image de MEGA[8], qui implémentent, en plus des diagrammes UML, des diagrammes permettant de représenter les différents processus de production, leur structure et les flux circulant dans le système (Figure 29). MEGA est au départ conçu pour représenter des

[8] http://www.mega.com

systèmes informatiques. Pour cette raison, certains termes utilisés ne sont pas tout à fait corrects sémantiquement pour une modélisation d'un système de production. Par exemple, les flux circulant ne sont pas appelés « flux » mais « messages ». La Figure 30 présente les éléments du formalisme graphique utilisé par MEGA pour les diagrammes de processus que nous utiliserons dans ce manuscrit.

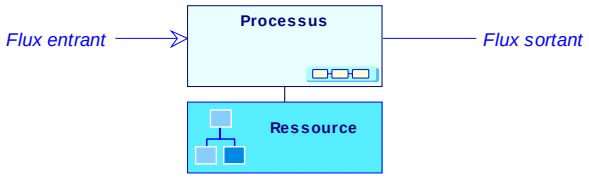



**Figure 29 : Exemple de diagramme de processus modélisé à l'aide de MEGA**

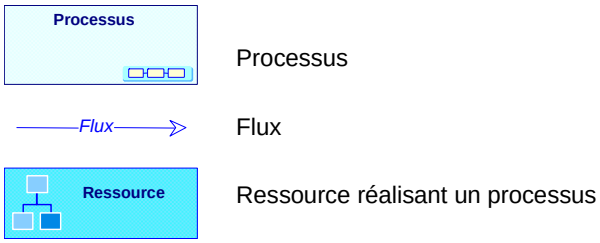



**Figure 30 : Eléments du formalisme graphique de MEGA Process**

Basés sur ces langages de modélisation, des **modules réutilisables**, comme ceux développés par Chirn & McFarlane (2000-1 et 2000-2), facilitent la reconfigurabilité des HMS par leur structuration sur des éléments mis en bibliothèque et réutilisables, et des architectures ouvertes comme celle proposée par Fletcher *et al.* (2000) vont dans le même sens en proposant un noyau de base composé de blocs de la norme IEC 61499 à adapter à chaque ressource holonique.

Ces différents langages, modèles de référence et cadres de référence ont été appliqués pour montrer la faisabilité et la pertinence des architectures holoniques dans des cas où le système doit être flexible ou doit faire face à des perturbations en se réorganisant dynamiquement. Ainsi, des **modèles** de HMS, comme ceux de Langer *et al.* (1999) qui proposent un système de contrôle pour plusieurs cellules holoniques (HoMuCS – Holonic Multi-cell Control System), et même des **systèmes opérationnels** ont été mis en place, à l'image de la plateforme d'assemblage de l'AutoId Lab de Cambridge (Garcia *et al.* 2003), ou de l'holon d'ordonnancement PaRSiFAL développé par Bongaerts (1998) et mis en place sur une cellule flexible à l'Université Catholique de Louvain.

Il n'existe pas à l'heure actuelle d'outil informatique commercialisé qui soit dédié aux HMS ou aux Systèmes Contrôlés par le Produit (SCP). Les seuls outils informatiques qui permettent de construire et de simuler des systèmes de ce type sont des outils développés par des universitaires, à l'aide de plateformes multi-agents (Ferber 1995, Marik 2004) comme Madkit[9] ou à l'aide de logiciels de simulation comme Arena[10] (Valckenaers *et al.* 1998).

Si, comme le prouvent ces applications pratiques, il est possible de mettre en œuvre des HMS, les travaux sur le sujet ne proposent, en dehors des principes orientés objets, aucune réelle

[9] http://www.madkit.org/
[10] http://www.arenasimulation.com/main.htm

méthodologie de modélisation de ces systèmes. En ce sens, il va nous falloir définir une méthode d'ingénierie d'automatisation des systèmes contrôlés par le produit.

## *2.3. Prédicats d'automatisation pour les Systèmes Contrôlés par le Produit*

Nous avons vu que les Systèmes Contrôlés par le Produit s'inscrivent dans le cadre des systèmes holoniques, pour lesquels il n'existe pas de méthodologie claire de modélisation. En particulier, au niveau du contrôle de l'exécution de la fabrication, il n'existe aucune méthode permettant de distribuer le contrôle dans les instances de produit et dans les ressources tout en assurant l'interopérabilité de ces deux systèmes.

En génie automatique, les méthodes de structuration modulaire (Alanche *et al.* 1986, El Khattabi 1993, Craye 1994, Pétin *et al*. 1998, Combacau 1998) permettant de distribuer la commande sur des architectures réparties, pourront servir de base méthodologique à la résolution de ce problème. En effet, les Systèmes Contrôlés par le Produit s'inscrivent dans ce principe de répartition de l'intelligence et de la prise de décision dans le système, à l'image des *Composants sur Etagère* (Galara & Hennebicq 1998). Il s'agit en ce sens d'une « décentralisation à l'extrême » puisque c'est le produit lui-même qui contrôle sa production.

### *2.3.1. Distribution du contrôle*

Dans le domaine de l'ingénierie d'automatisation et du contrôle-commande, l'évolution des architectures centralisées vers des architectures décentralisées, voire réparties, peut se justifier par le fait que répartir la commande, afin de placer les organes décisionnels au plus près de leur site d'action, va dans le sens d'une meilleure flexibilité de la commande et d'une sûreté de fonctionnement accrue (Lhoste & Morel 1996) ainsi que par les besoins en réutilisabilité de composants logiciels (Sfalcin 1992) exprimés par les industriels.

Les systèmes manufacturiers laissent apparaître en profondeur un caractère répétitif de leur constitution autour d'éléments technologiques, le plus souvent standard, auxquels il est possible d'associer un comportement logique (Projet CASPAIM Craye 1994), indépendant du contexte de leur utilisation. Des méthodes de structuration des systèmes de contrôle-commande, répondant à ces nouvelles préoccupations, ont été initiées dans le milieu des années 80 et ont abouti au concept de "Filtre de comportement" (Alanche *et al.* 1986).

Partant de l'hypothèse que la structure de la Partie Opérative (PO) est porteuse de solutions pour atteindre les objectifs de son automatisation, il a été démontré (Lhoste & Morel 1996) que le comportement des systèmes industriels peut se représenter sous la forme d'un réseau ordonné de comportements élémentaires correspondant aux équipements (également appelés Eléments de Partie Opérative (EPO)) d'une installation. Cette description comportementale intrinsèque à un élément technologique mise au service d'un système de commande est placée en interface entre la partie commande et la partie opérative (Figure 31). Elle permet ainsi d'introduire une solution "distribuée" de la commande et de la surveillance des éléments de partie opérative, car son rôle consiste :

- à filtrer les commandes fonctionnelles émises à destination des équipements technologiques en vérifiant leur compatibilité vis-à-vis de leur état courant,
- à filtrer les observations en les comparant au comportement normal modélisé.

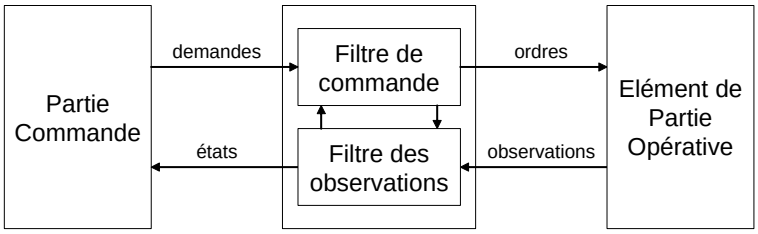



**Figure 31 : Principe d'utilisation d'un filtre de commande**

Ce découplage, ou ce filtrage, entre une commande de haut niveau et les éléments de partie opérative qu'elle pilote contribue à la rendre la plus indépendante possible de la technologie de réalisation.

La Figure 32 présente l'exemple d'un filtre de comportement d'un Elément de Partie Opérative composé d'un vérin double effet préactionné par un distributeur 5/2 bistable, et de deux capteurs de fin de course. Nous remarquons dans cette figure que le Grafcet de Comportement Normal (GCN) est initialisé par le Grafcet de Gestion des Modes, ce qui revient à dire que tout état de l'Elément de Partie Opérative est initialisable selon les modes d'initialisation requis.

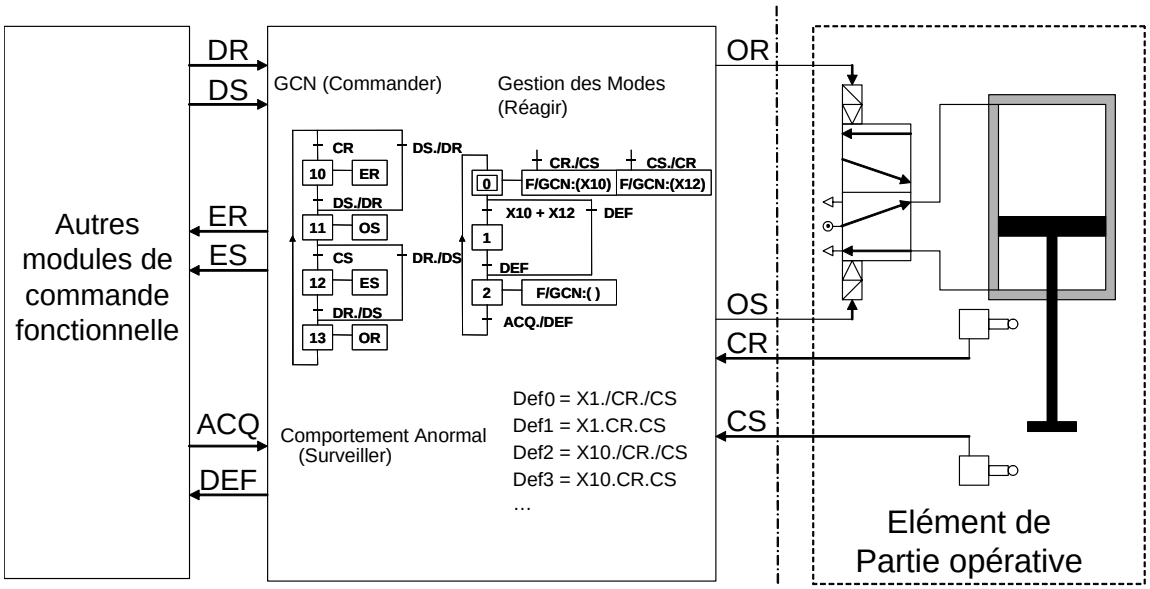
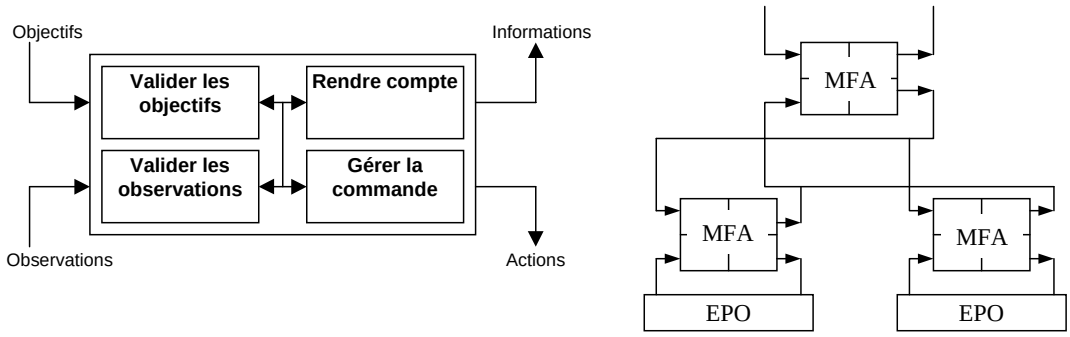



**Figure 32 : Exemple de filtre de comportement placé en interface**

D'un point de vue méthodologique, la généralisation du filtre de comportement à des niveaux moins technologiques et son utilisation récursive permettent d'envisager une structuration modulaire hiérarchique des Systèmes Automatisés de Production (Figure 33b) sous la forme d'objets d'automatisation (Alanche *et al.* 1986) ou encore de modules fonctionnels d'automatismes (Belhimeur 1989) (Figure 33a).




a) Module Fonctionnel d'Automatisme (MFA) b) Organisation fonctionnelle hiérarchique

**Figure 33 : Utilisation récursive de filtres de commande (Belhimeur 1989)**

Ces objets assurent la réalisation d'un service en réponse à une sollicitation externe (provenant d'objets d'automatisation de niveau hiérarchique supérieur ou équivalent) en mettant à contribution les ressources dont ils disposent (objets d'automatisation de niveaux inférieurs ou équivalents). Le système de commande résultant est alors constitué d'un ensemble de modules coordonnés et/ou coopérants.

La spécification du comportement de ces différents modules peut se réaliser en utilisant les blocs fonctionnels (Christensen dans Deen 2003) de la norme IEC 61499 (IEC 2000 et 2001) (Lewis 2001). Les blocs de cette norme peuvent être utilisés pour l'encapsulation, la réutilisabilité, la distribution et l'intégration des aspects physiques et logiciels des holons. Leur implantation sur des architectures à base d'automates programmables se fait par l'utilisation des blocs fonctionnels et les langages de programmation de la norme IEC 61131-3 (IEC 1993).

Ces méthodes de structuration facilitent la modélisation des systèmes automatisés par une décomposition modulaire, et permettent une implémentation des différents modules de contrôle/commande. Cependant, ces approches sont essentiellement centrées sur des objectifs relatifs aux équipements sans réellement prendre en compte dans leur démarche les contraintes relatives aux spécifications techniques des produits. En ce sens, la démarche d'automatisation que nous proposons devra être étendue pour prendre en compte le contrôle de deux types d'objets : les processus de fabrication et les produits.

### *2.3.2. Approche produit / processus*

En nous référant à la norme ANSI/ISA-95, qui propose une représentation unifiée des objets de la production, nous montrons dans la Figure 34 que le contrôle des ressources *à l'instant t* devra leur permettre d'assurer la réalisation des segments de processus, en respectant les spécifications des équipements, et que le contrôle par le produit de sa production *à travers le temps* respectera les règles de production et les relations de précédence entre les segments de produits.

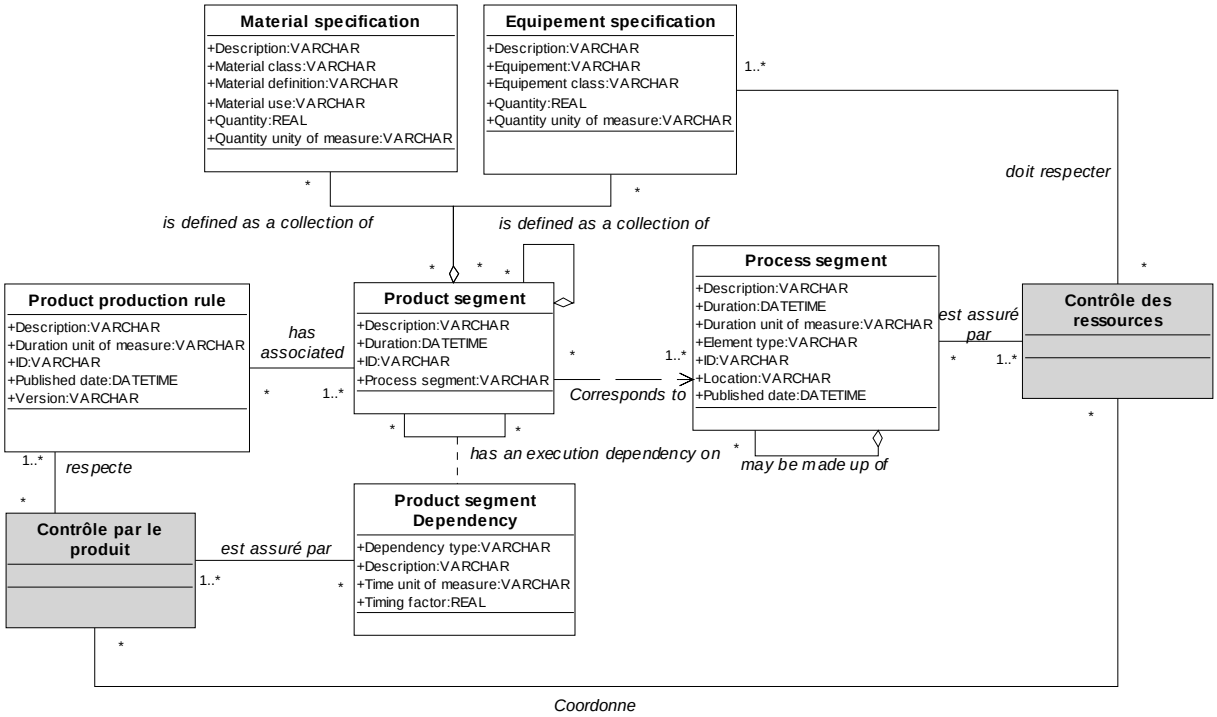



**Figure 34 : Lien entre les objets de la norme et les éléments du contrôle par le produit**

Nous voulons mettre en évidence par ce diagramme que les spécifications du contrôle des ressources doivent intégrer un aspect générique relatif aux processus assurés par les ressources, tout en respectant les spécifications (matérielles) des équipements. Il montre également que les spécifications du contrôle de la production par le produit sont basées sur le procédé de fabrication de chacun de ces produits.

En ce sens, comme nous l'avons présenté dans l'introduction, nous déclinons le prédicat d'automatisation de Fusaoka *et al.* (1983) selon deux axes. Le premier concerne la génération d'une structure de commande des ressources contrôlées par le produit *à l'instant t* :

*Dynamique des ressources de production*
$\wedge$ *Règles inconnues de contrôle par le produit des opérations*
$\supset$ *Services requis par le produit* (2)

La deuxième interprétation de ce paradigme s'intéresse plus particulièrement au contrôle par le produit de sa propre production, en d'autres termes la coordination par le produit des différentes ressources de production *à travers le temps* :

*Services proposés par les ressources de fabrication*
$\wedge$ *Règles inconnues de contrôle par le produit de la production*
$\supset$ *Gamme de fabrication du produit* (3)

Notre proposition de résolution de ces deux prédicats sera contrainte par la nécessité de satisfaire les propriétés suivantes :

- interopérabilité et absence de blocage entre le contrôle par le produit de son routage à travers le système et le contrôle des ressources du système de fabrication,

- génération « en ligne » du contrôle du routage spécifique à chaque nouvelle instance de produit,
- modularité de la partie commande des ressources.

A ces contraintes, il convient d'ajouter le critère relatif à la sûreté de fonctionnement des systèmes fortement répartis dans la mesure où, comme le montre Johnson (2004) plus le système est complexe, moins il est fiable et disponible (Figure 5).

## *2.4. Techniques de synthèse pour le contrôle par le produit*

Parmi les modèles et méthodes des Systèmes à Evénements Discrets, deux voies distinctes permettent la résolution formelle de ces prédicats.

La première consiste à proposer un modèle de commande à partir des spécifications de l'utilisateur et du système à automatiser et de vérifier a posteriori le respect des prédicats de l'automatique. Cette approche s'inscrit dans le cadre classique des méthodes de validation par simulation et/ou de vérification formelle proposées en Génie Automatique (Morel *et al.* 2004). Dans le domaine des systèmes distribués, les résultats utilisant la simulation, le *model checking* (Vyatkin et Hanisch 2003) ou le *theorem proving* (Pétin *et al.* 1998, Lamboley 2001, Morel *et al.* 2001) sont intéressants mais ne permettent en aucun d'envisager la définition « en ligne » du contrôle par le produit dont notre approche a besoin.

La seconde voie consiste à obtenir, par construction, des modèles de commande respectant les prédicats. En ce sens, les techniques de synthèse formelle de la commande, utilisées classiquement dans le cadre de la théorie de la supervision de Ramadge & Wonham (1987) sont une réponse possible à la génération automatique et sûre de contrôleurs. Elles doivent permettre de synthétiser « hors-ligne » les contrôleurs des ressources de production, mais également de synthétiser « en ligne », pour répondre à la variabilité, les contrôleurs des produits entrant sur le système de production.

### *2.4.1. Principes de base du contrôle par supervision*

#### 2.4.1.1 Théorie du contrôle par supervision

La théorie du contrôle par supervision (Ramadge & Wonham 1987, Thitsle 1996, Wonham 2001) est une approche du contrôle des Systèmes à Evénements Discrets (SED) (Kumar & Garg 1995-2, Cassandras & Lafortune 1999). La situation considérée au départ par cette théorie est celle d'un SED à un niveau d'abstraction non temporisé (ou logique), dont le comportement est contraint par une boucle de contrôle afin de satisfaire un ensemble de spécifications comportementales.

Deux éléments sont donc présents dans cette boucle de contrôle (Figure 35) :

- le procédé G, qui correspond au système à contrôler,
- le superviseur S, qui, s'il existe (Sreenivas 1997), va contraindre le comportement du procédé en interdisant et en autorisant des événements.

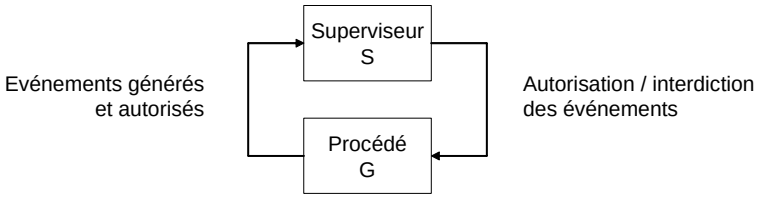



**Figure 35 : Boucle de contrôle par supervision**

Dans le cadre de la théorie de base du contrôle par supervision, le procédé est modélisé par un automate non temporisé G (Autebert 1994, Seebold 1999, Sakarovitch 2003) qui représente tous les états possibles que peut atteindre le procédé sans contrôle. En partant du principe que G ne respecte pas toujours naturellement les spécifications comportementales décrivant le fonctionnement général du procédé automatisé, il faut restreindre le comportement du procédé en interdisant ou en autorisant certains événements qui provoquent ses évolutions, afin de le maintenir dans un ensemble d'états compatibles avec la spécification. Ainsi, les interactions nécessaires entre le procédé et le superviseur induisent les notions de contrôlabilité (Flordal *et al.* 2004) et d'observabilité (Yoo & Lafortune 2000-2) des événements.

Formellement, un procédé est représenté (Figure 36) par un automate à états ($Q$, $\Sigma$, $q_0$, $A$, $Q_m$) interprété comme un générateur spontané d'événements, avec :

- $X$ l'ensemble des états $x$ dont l'état initial est $x_0$,
- $\Sigma$ l'ensemble des événements ($\Sigma_c$ les événements contrôlables et $\Sigma_u$ les événements incontrôlables),
- $A$ est l'ensemble des transitions entre les états. Une transition est définie par un triplet (état source, événement, état cible) traduisant le passage du système d'un état à un autre, suite à l'occurrence d'un événement appartenant à $\Sigma$. Il est également possible de définir une fonction partielle de transition $\alpha$,
- $X_m$ représente l'ensemble des états marqués reflétant l'accomplissement d'une tâche.

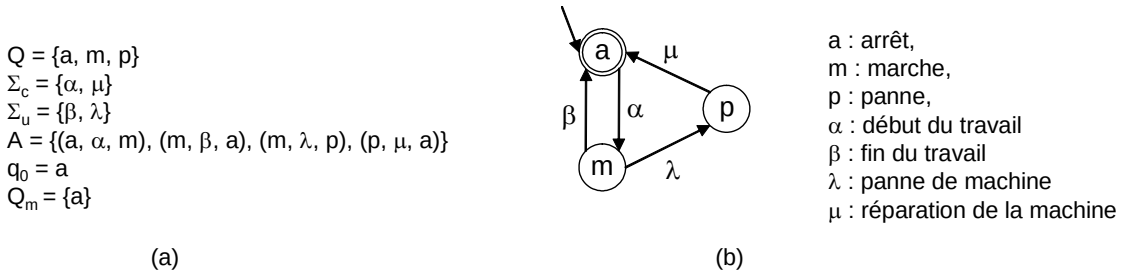



**Figure 36 : Automate décrivant une machine simple : (a) modèle formel, (b) représentation graphique. D'après Ndjab (1999)**

Ce cadre théorique se veut comparable à celui de la théorie du contrôle utilisée sur des systèmes de type continu permettant notamment de déduire les propriétés de performance et de stabilité d'un correcteur en fonction d'un modèle de procédé et des consignes auxquelles il est soumis.

Dans le cadre des Systèmes à Evènements Discrets, la théorie du contrôle par supervision doit permettre la synthèse d'un superviseur satisfaisant aux contraintes énoncées ci-dessus. Notons toutefois que ce superviseur agit sur le procédé de façon autonome, sans faire appel à des stimuli extérieurs afin de faire évoluer le procédé automatisé. Cet isolement du système

(superviseur + procédé) peut paraître surprenant dans le cadre de l'automatisation des systèmes réactifs soumis à de fortes contraintes en provenance de l'environnement.

#### 2.4.1.2 Algorithmes de synthèse de superviseur

A partir d'un modèle de spécifications comportementales et d'un modèle de procédé, l'opération de synthèse de superviseur a pour but de déterminer automatiquement un modèle de superviseur permettant de s'assurer que le système automatisé respecte les exigences établies dans les spécifications (Figure 37) (Lin *et al.* 1988).

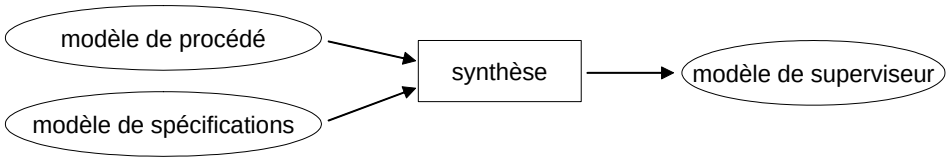



**Figure 37 : Principe de la synthèse de superviseur**

Cette synthèse revient à résoudre l'équation du paradigme d'automatisation proposé par Fusaoka *et al.* (1983) :

$$\textit{Dynamics} \wedge \textit{Unknown control rules} \supset \textit{Goal}$$

En d'autres termes, l'objectif consiste "*à trouver les règles dynamiques de comportement d'un système à partir de la connaissance du comportement dynamique du procédé à automatiser et des objectifs à atteindre"* (Lamboley 2001). Fusaoka *et al.* (1983) explique, en se basant sur la logique temporelle, qu'il est possible de résoudre automatiquement cette équation.

Dans cet esprit, sur les bases de la théorie de la supervision des systèmes à événements discrets introduite par Ramadge et Wonham (1987), des algorithmes permettant la synthèse automatique d'un superviseur à partir d'un modèle de procédé et d'un modèle de spécifications, exprimés dans le formalisme des automates à états finis, vont être proposés (Wonham & Ramadge 1987, Brandt *et al.* 1990, Kumar *et al.* 1991, Kumar & Garg 1995-1, 1995-2, Zhang & Wonham 2001). Ces derniers, qui présentent l'avantage d'être automatisables et programmables dans des systèmes informatiques, reposent principalement sur :

- la composition synchrone des automates décrivant les modèles de procédé et de spécifications,
- la détermination des états défendus : un état défendu est tel qu'il existe un événement non contrôlable admis dans le modèle du procédé, mais interdit dans la spécification,
- la détermination des états faiblement défendus : un état faiblement défendu est tel qu'il existe une séquence d'événements incontrôlables dans le produit synchrone *procédé* × *spécification* qui conduit à un état défendu,
- et enfin élimination des états défendus et faiblement défendus pour aboutir au superviseur.

Si ces techniques doivent permettre la synthèse de la commande, comme l'on montré Niel *et al.* (2001) et Pietrac *et al.* (2002) sur des cas d'étude de dimension réduite, leur application pour la synthèse de commande à un niveau industriel pose encore quelques problèmes.

## *2.4.2. Application à la synthèse de la commande*

### 2.4.2.1 Modélisation du procédé et des spécifications

Dès lors que l'on s'attache à modéliser des systèmes de complexité industrielle, l'utilisation de formalismes de représentation abstraits, sous une forme fonctionnelle, ensembliste, …, s'avère une condition nécessaire pour appréhender, de manière pragmatique, intuitive, voire qualitative, le fonctionnement global d'un système à concevoir ou à rénover. Marikar *et al.* (1998) traduit ce constat par "*Control design is still an art where the engineer somehow incorporates all the performance and safety requirements of the system into code through experiences"*. Ainsi, dans la pratique, la modélisation d'un système industriel met en jeu divers modèles plus ou moins formels, exprimés à différents niveaux d'abstraction, permettant d'abord d'appréhender qualitativement le fonctionnement global d'un système, avant de modéliser quantitativement sa dynamique.

En revanche, les modèles, préalablement définis, à partir desquels les techniques de synthèse permettent la génération d'un modèle de superviseur, représentent concrètement et formellement la dynamique du système à commander et les spécifications du comportement attendu, et sont donc, par nature, non évolutifs (non raffinables) comme l'ont mis en évidence Brandin *et al.* (2000, 2004). En ce sens, l'approche proposée par Chen *et al.* (1997, 2000) cherche à résoudre cette difficulté. Cependant dans les approches plus classiques, les modèles de système à contrôler et des objectifs utilisés en synthèse, sont des représentations détaillées, exhaustives et bien souvent « à plat » d'un système, ou d'une partie d'un système. Les formalismes utilisés sont souvent peu structurants : automates à états finis (Sakarovitch 2003), logique des prédicats (Sanchez & Macchieto 1995), logique temporelle (Fusaoka *et al.* 1983), ou encore les réseaux de Petri (Godon 1996, Holloway *et al.*1997).

L'obtention de ces modèles s'avère donc souvent difficile sans une analyse préalable, notamment à cause de la taille des modèles, du manque de convivialité et d'expressivité des formalismes utilisés ou du manque de méthode.

#### 2.4.2.1.1 Pour répondre au manque de convivialité et d'expressivité

Pour répondre au manque de convivialité des modèles formalisés avec des automates à états (Shayman & Kumar 1995-1), d'autres formalismes de modélisations ont été utilisés (Chandra & Kumar 2001-1, 2001-2), et des algorithmes de synthèse de superviseurs spécifiques ont également été développés. C'est le cas par exemple du langage synchrone Signal avec les travaux de Marchand *et al.* (1998, 2000) ou de la logique temporelle pour Lin (1993), mais surtout des réseaux de Petri (Fabian & Lennartson 1994, Godon 1996, Godon & Ferrier 1997, Wonham 2003), permettant ainsi de traiter les problèmes tels que le parallélisme. Pour ces derniers, il est possible de synthétiser un superviseur à l'aide de la théorie des régions comme le font Ghaffari *et al.* (2001, 2002).

D'autre part, dans le cadre de la modélisation de systèmes réactifs, Takai (2000) montre que l'expression et la prise en compte de contraintes temporelles est incontournable. Ce constat justifie les approches à base de logique temporelle (Fusaoka *et al.* 1983, Sanchez & Macchieto 1995), d'automates temporisés (Gouin *et al.* 1997, Gouin 1999, Gouin & Ferrier 1999), ou encore de réseaux de Petri à « arcs temporisés » (Chen & Hanisch 1999) pour modéliser des contraintes temporelles, principalement dans les spécifications. Il est en effet possible d'exprimer par exemple qu'une situation donnée doit toujours finir par arriver. Ceci

s'oppose aux contraintes de sûreté qui permettent d'exprimer ce qui ne doit jamais arriver et qui conduit aux états défendus des algorithmes classiques de synthèse. Cette notion de temps a également permis d'intégrer des éléments dans la commande tels que la prise en compte des modes de marche (Khatab & Niel 2002) ou l'ordonnancement des tâches (Boel 2000).

Ce cadre du contrôle par supervision a été également étendu au contrôle des Systèmes Hybrides (Xia *et al.* 2002, Moor *et al.* 2002), avec des algorithmes spécifiques aux formalismes de modélisation des systèmes hybrides (Heymann *et al*. 1998).

#### 2.4.2.1.2 Pour diminuer l'explosion combinatoire

L'explosion combinatoire est en partie due aux algorithmes utilisés pour effectuer la synthèse de superviseurs. Pour cette raison, différents algorithmes, utilisant des modèles plus compacts, ou des procédures de calculs différentes ont été développés, comme ceux présentés par Zhang & Wonham (2001) et Su & Wonham (2004), et utilisent par exemple le concept de co-algèbre (Komenda 2002).

Elle est également due aux formalismes employés pour les modèles (Gohari & Wonham 2000, Yoo & Lafortune 2001). En ce sens, certains travaux préconisent l'utilisation de formalismes « plus expressifs » ou « plus compacts », tels que les réseaux de Petri pour Fabian & Lennartson (1994), Fabian (1995), Sreenivas (2002) et Achour *et al*. (2004), les réseaux de Petri interprétés pour Aguirre-Salas *et al*. (2002), ou une approche algébrique, comme l'utilisation de l'algèbre I de Jean-Marc Roussel (Roussel & Faure 2003, Roussel *et al.* 2004). D'autres formalismes se basent sur différents niveaux hiérarchiques en utilisant des modèles comme les machines à état finis hiérarchiques (Brave & Heymann 1993, Gaudin & Marchand 2003), réduisant ainsi la complexité des modèles puisque la répartissant sur plusieurs niveaux.

Pour diminuer cette explosion combinatoire, il est également possible de décomposer les différents modèles de sorte à limiter le nombre d'états à traiter (synthèse hiérarchique, modulaire ou décentralisée (Chafik 2000)) ou de procéder par composition masquée à l'image de Shayman & Kumar (1995-2). Les travaux allant dans ce sens constituent un axe majeur de la recherche sur la théorie du contrôle par supervision.

Ainsi, la décomposition peut porter soit sur le modèle du procédé, soit sur la spécification du comportement attendu, ou encore sur les deux parties (procédé et commande) (Chafik & Niel 2000-1, 2000-2). Pour mieux comprendre ces approches, détaillons deux approches de décomposition horizontale, telles que l'approche modulaire et l'approche décentralisée, et une décomposition verticale, telle que l'approche hiérarchique.

L'approche modulaire (Figure 38) permet d'associer plusieurs contrôleurs de même niveau (d'où le terme de "horizontale") à un même procédé (Wong & Wonham 1998, DeQueiroz & Cury 2002). Ceux-ci travaillent alors parallèlement et en concurrence, ce qui peut faire apparaître des conflits ou des blocages (Bourdon *et al*. 2002), lorsque par exemple, un contrôleur force un événement, alors qu'un autre l'interdit.

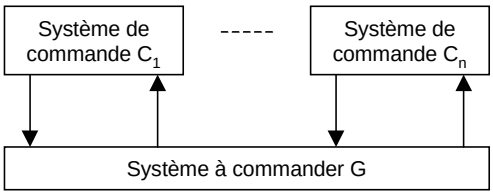



**Figure 38 : Structure de commande modulaire**

L'approche par supervision décentralisée (Lin & Wonham 1988, 1990, Hanisch *et al.* 1997, Barret & Lafortune 1998-1, 1998-2, Yoo & Lafortune 2000-1, 2000-2, 2002-1, 2002-2, Jiang *et al.* 2001, Tripakis 2002, Takai & Ushio 2003) (Figure 39) consiste à décomposer (horizontalement) le procédé en sous-systèmes à contrôler possédant chacun leur propre contrôleur local. Dans ce cas les contrôleurs travaillent également en parallèle et en concurrence et peuvent créer des conflits, sauf si on respecte au minimum une contrainte de normalité des modèles (Takai & Ushio 2001). Ainsi, un procédé G sera décomposé par des projections normales en divers sous-ensembles (G1 et G2 sur la Figure 39) sur lesquels agiront des contrôleurs locaux (Jiang & Kumar 2000).

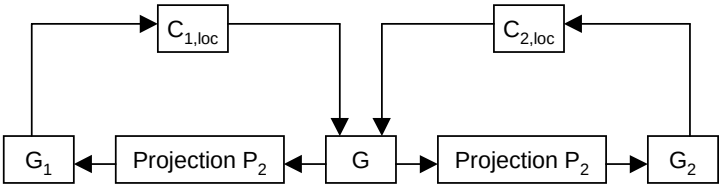



**Figure 39 : Contrôle par supervision décentralisée (Lin & Wonham 1990)**

L'approche de supervision hiérarchique de Zhong (Zhong & Wonham 1990, Wong & Wonham 1996, Gohari 1998, Gohari & Wonham 1998) repose sur l'obtention de modèles simplifiés du procédé et permet d'obtenir des superviseurs concis et d'un niveau d'abstraction supérieur, comme l'ont montré Chen & Hanisch (2000) et Chen & Lin (2001). Le modèle de la Figure 40 considère deux niveaux hiérarchiques dont le plus bas est constitué d'un procédé $G_L$ et de son contrôleur $C_L$, puis d'un niveau haut formé d'un modèle $G_H$ et de son contrôleur $C_H$. $G_L$ est le procédé réel qui sera contrôlé par $C_L$, alors que $G_H$ est un modèle abstrait de $G_L$, utilisé avec son contrôleur $C_H$ pour prendre des décisions plus globales et plus abstraites (DaCunha *et al.* 2002) que les décisions prises au niveau bas. Leduc *et al.* (2000) propose que la liaison entre deux superviseurs de niveaux différents soit assurée par une interface, permettant .

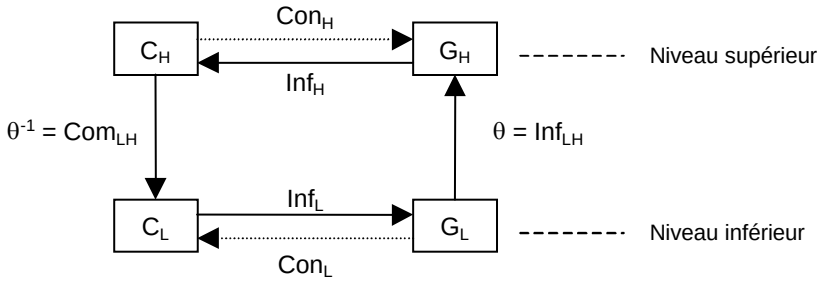



**Figure 40 : Modèle de Zhong**

Ces décompositions, horizontales et verticales, permettent de réduire l'explosion combinatoire, en structurant les modèles. Dans ce sens, des travaux préconisent l'utilisation de principes de modélisation « orientés-objets » (Aubert & Dixneuf 1991, Bouzeghoub *et al.*

1997) afin de formaliser les modèles (Lennartson *et al.* 1998-1) de spécifications (Lennartson *et al.* 1998-2, Romanovski & Caines 2002) et de procédés utiles à la synthèse (Fabian & Lennartson 1995-1).

D'autres approches et cadres de modélisation ont également été proposés (Shayman & Kumar 1995-1) pour faciliter la modélisation des spécifications, par l'interdiction d'états par exemple (Ou & Hu 2000), et la décomposition des modèles de procédés en fonction de la structure physique du système à contrôler (Gouyon *et al.* 2002, 2003-1, 2004-1).

Les différentes décompositions ont permis ainsi de gagner en modularité et en reconfigurabilité au niveau de la commande générée à l'aide des algorithmes de synthèse de superviseurs. Il est en effet possible de réutiliser une partie de la structure de commande sans avoir à resynthétiser toute l'architecture de commande (Chen *et al.* 1997), voire d'utiliser des composants en bibliothèque, comme cela est classiquement fait pour les approches orientées objet à l'image de celle de Fabian (1995). Il est aussi possible d'interfacer les superviseurs à un niveau fonctionnel, indépendant de la technologie, permettant, lors de l'évolution ou de la reconfiguration du système à commander, une évolution incrémentale des modèles utilisés, et une réutilisabilité des superviseurs déjà synthétisés (Chen *et al.* 2000).

La plupart de ces travaux a comme préoccupation principale d'éliminer l'explosion combinatoire. En pratique, les approches développées aboutissent à un superviseur souvent structuré pour des raisons techniques liées à l'explosion combinatoire, et non justifiée par des contraintes organisationnelles du procédé et de sa commande. La décomposition qui en résulte ne facilite pas toujours l'implantation du superviseur ainsi obtenu. Ceci reflète en réalité le manque de méthodologie permettant de servir de guide à l'utilisation de la synthèse.

#### 2.4.2.1.3 Pour servir de guide méthodologique

En effet, d'un point de vue méthodologique, les modèles servant de base à la synthèse doivent être considérés comme des modèles "ultimes" résultant d'un procédé de modélisation qui contribue à la formalisation des services attendus d'un système automatisé et à la modélisation des processus de commande, des processus opérants et de leurs interactions structurelles. De ce fait, la définition d'un cadre méthodologique permettant de couvrir les premières phases de modélisation et de structuration d'un système s'avère indispensable pour l'utilisation de techniques formelles de synthèse en ingénierie d'automatisation.

Ainsi, un procédé complet d'automatisation, tel que celui proposé par Sanchez & Macchieto (1995) (Figure 41), devra être basé sur une approche méthodologique couvrant, avant la phase classique de synthèse, les phases de spécification et de modélisation.

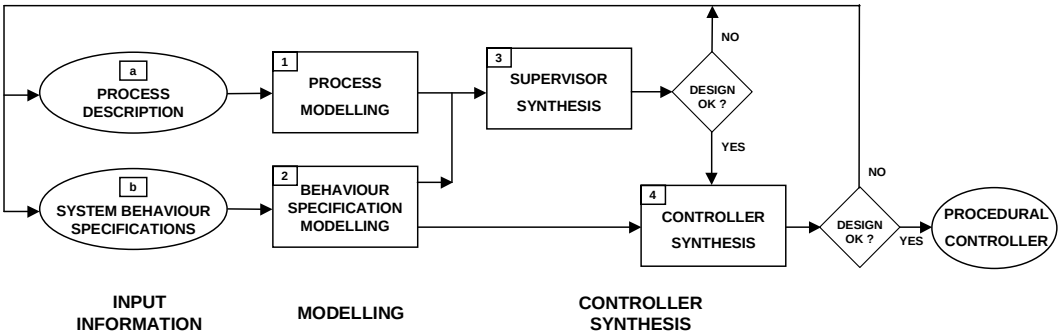



**Figure 41 : Procédure de synthèse de contrôleur procédural selon (Sanchez & Macchieto 1995)**

De plus, cette démarche fait apparaître l'importance de la phase d'implantation du superviseur obtenu par synthèse sur une architecture industrielle.

Un autre point de vue consiste à utiliser la synthèse à des fins de vérification de programmes de commande spécifiés dans d'autres langages, tels que le Grafcet (IEC 1988) (Zaytoon *et al.* 1996, 1997), et cela d'une manière « hors ligne » (Zaytoon *et al.* 1999), c'est-à-dire faite lors de la conception du programme de commande, ou même « en ligne » (Ndjab & Zaytoon 1999). En ce sens, Ndjab & Zaytoon (1999) et Zaytoon & Carré-Ménétrier (2001) proposent une méthode présentant deux étapes parallèles, l'une pour extraire un modèle de commande à partir d'une spécification en Grafcet, l'autre pour synthétiser un superviseur décrivant les trajectoires admissibles pour un procédé indépendamment de toute commande. L'intersection entre ces deux résultats permet d'aboutir à une commande ne retenant que les évolutions et les actions autorisées par le superviseur (Figure 42). Dans ce cas, le superviseur maintient le système dans un ensemble d'états respectant des propriétés telles que la vivacité ou le non-blocage, et le contrôleur dirige le procédé pour aboutir à un certain objectif comportemental, pour accomplir un ensemble de tâches spécifiques (Carré-Ménétrier & Zaytoon 2001).

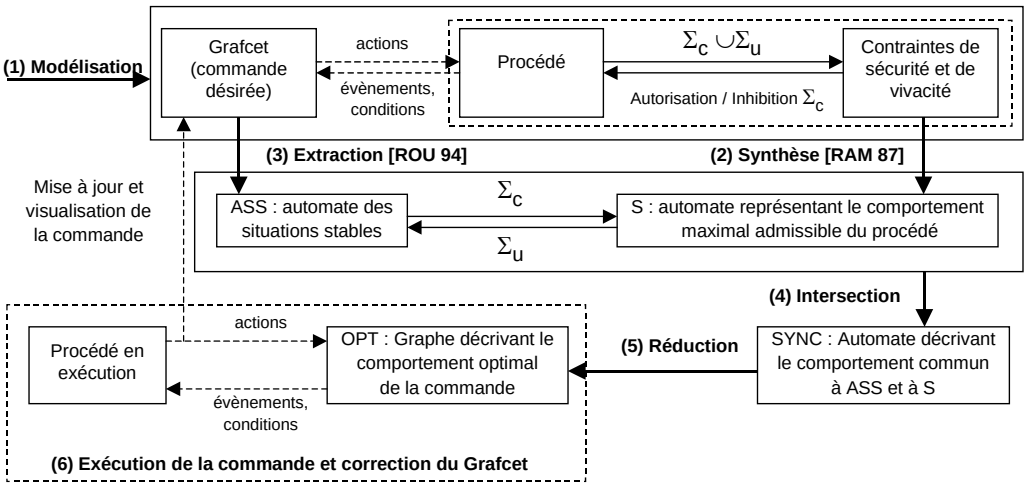



**Figure 42 : Les étapes de l'approche de synthèse hors ligne (Ndjab & Zaytoon 1999)**

Dans l'objectif d'intégrer les spécifications de la commande au processus de synthèse, des approches sont également développées sur des méthodes, modèles ou architectures de référence. A titre d'exemple, Hellgren (2000) propose une approche reposant sur une architecture qui structure un modèle de système de production en modèles de description des ressources, des produits et des gammes de fabrication. Ces approches permettent de fournir un cadre commun pour la modélisation du procédé, des contraintes de sûreté de fonctionnement mais également des spécifications de commande vis-à-vis d'objectifs fixés par l'environnement de production, préalablement à l'utilisation des techniques de synthèse. L'intérêt de ce type de travaux réside dans l'intégration de techniques formelles dans des architectures de référence peu formalisées puisque ayant pour objectif d'appréhender de manière quantitative la modélisation d'un système industriel.

#### 2.4.2.2 Implantation de la commande obtenue par synthèse

Si la théorie de la supervision et les techniques de synthèse associées constituent un apport théorique indéniable pour la conception de systèmes de commande à Evénements Discrets, sa

diffusion dans le monde industriel reste cependant très limitée: *"peu de travaux concernent la manière d'implanter une commande issue de la théorie car les procédures de synthèse fournissent un modèle d'un superviseur abstrait qui ne peut pas être implanté en l'état sur un système réel"* (Ndjab & Zaytoon 1999).

Si on suppose connus les modèles de spécification et de procédé, il est alors possible de synthétiser un élément de haut niveau, appelé superviseur, qui permet d'interdire et/ou d'autoriser des événements, en vue de contraindre le comportement du système à contrôler. Ce comportement contraint est représenté sous la forme d'un automate correspondant à l'ensemble des états admissibles du procédé et à l'ensemble des évolutions possibles entre ces états.

En revanche, un système de commande industriel se doit de forcer (et non d'interdire) des signaux logiques de sortie (et non des événements). Ce constat conduit à distinguer la notion de superviseur de celle de contrôleur en considérant :

- soit l'ensemble des deux comme un ensemble hiérarchisé tel que la *commande supervisée* de Charbonnier (1996 et Charbonnier *et al.* 1999) (Figure 43),
- soit le second comme un raffinement du premier (*Procedural control theory)* (Marikar *et al.* 1998), suivant certaines règles de raffinement.

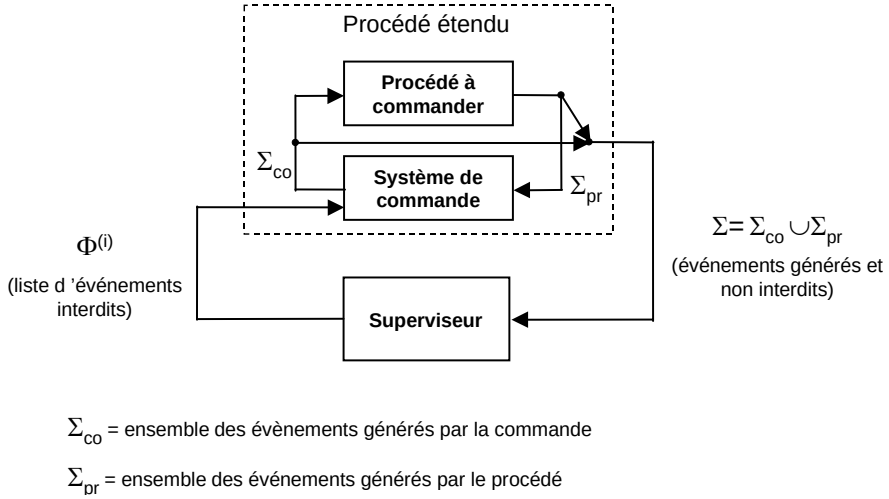



**Figure 43 : Principe de la commande supervisée selon Charbonnier (1996)**

Dans ce dernier cas, comme l'ont montré les travaux portant sur l'interprétation des superviseurs (Marikar *et al.* 1998, Hellgren 2000, Hellgren *et al.* 2001), le problème réside alors dans les techniques à appliquer et les hypothèses sur lesquelles elles reposent, pour passer d'un superviseur définissant les trajectoires possibles, au sens de séquences ordonnées d'états, tel que généré par les algorithmes de synthèse (Ramadge & Wonham 1987, Brandt *et al.* 1990, Kumar & Garg 1995-1) à un contrôleur totalement déterministe[11] en vue de son implantation (Fabian & Lennartson 1995-2, Dietrich *et al.* 2001). En effet, pour lever cet indéterminisme, mis en avant par les travaux de Shayman & Kumar (1995-2), Kumar & Shayman (1996, 1997) ou encore Jiang & Kumar (1999)), il est nécessaire de faire des choix, qui peuvent se traduire par des priorités sur les transitions, voire par la suppression de

[11] Il s'agit ici de déterminisme d'évolution : pour un modèle donné, à un instant quelconque du temps, il n'y a, pour événement sur une transition sortant d'un état, qu'un seul état compatible.

certaines séquences, et de les fonder sur des hypothèses qui devraient permettre leur systématisation dans le cadre d'une démarche complète d'automatisation.

Ensuite, en supposant que ces solutions obtenues sont correctes, les superviseurs ainsi générés, même s'ils sont totalement déterministes, ne sont pas encore exploitables directement sur des systèmes de contrôle/commande réels, et doivent encore être traduits dans des langages de programmation spécifiques ou normalisés, tels que ceux définis par la norme IEC 61131-3 (IEC 1993).

Cette dernière opération est détaillée par Balemi *et al.* (1993) qui interprète les événements contrôlables comme des sorties de la commande et les événements incontrôlables comme des entrées (Figure 44).

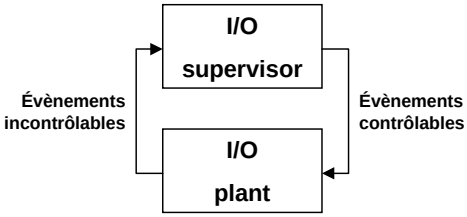



**Figure 44 : Interprétation en entrées/sorties du contrôle par supervision selon Balemi *et al.* (1993)**

Dans le cadre de la commande d'un système réactif, le système doit réagir instantanément aux stimuli, ce qui implique que la réaction du système (une ou plusieurs sorties correspondant à des événements contrôlables) à un événement d'entrée (événement incontrôlable) doit survenir avant l'arrivée d'un nouveau stimulus d'entrée. Cette interprétation impose donc au superviseur de ne comprendre que des séquences ayant au moins un événement contrôlable entre deux événements non contrôlables (Figure 45).

**Figure 45 : Exemple d'alternance de séquence d'entrées/sorties autorisée**

Dans le cas où l'automate du superviseur présenterait des séquences de transitions enchaînant plusieurs événements incontrôlables, nous ne nous pourrions pas, sauf en supprimant ces séquences indésirables, appliquer complètement cette interprétation. Même si cette approche présente l'avantage de lever l'ambiguïté entre superviseur et contrôleur puisque tous les événements sont interprétables en termes d'entrées/sorties, elle n'apporte cependant aucune garantie quant au déterminisme de ce contrôleur pourtant nécessaire pour sa traduction dans un langage de programmation.

Sous réserve de ces hypothèses de déterminisme, Fabian & Hellgren (1998) proposent un équivalent en Ladder de l'automate obtenu par synthèse. Ainsi, chaque état et chaque événement est représenté par une variable booléenne, et les transitions par un *ET* logique entre les variables représentant les états et les événements (Figure 46) qui active et/ou désactive les variables représentant les états. L'interprétation proposée est asynchrone, c'est-à-dire que les événements internes sont réutilisés dès leur apparition pour les franchissements des transitions. Ces derniers vont donc dépendre de la relation d'ordre entre les réseaux représentant les différentes équations.

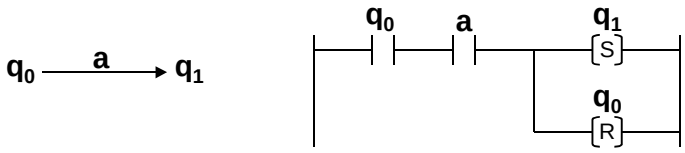



**Figure 46 : Interprétation d'un automate en Ladder Diagram selon Fabian & Hellgren (1998)**

Le problème d'une telle approche, réside alors dans la vérification des hypothèses de départ, à savoir le déterminisme d'évolution du superviseur.

D'autres approches ont été proposées, qui permettent d'interpréter selon certains critères, qui peuvent être des choix de conception comme le proposent Diedrich *et al*. (2001), l'automate du superviseur en un contrôleur implantable (Chandra *et al.* 2001) en Ladder Diagram (Liu & Darabi 2002), en Sequential Function Chart (Hellgren *et al* 2001) ou en Grafcet (Carré-Ménétrier *et al.*1999, Charbonnier *et al.* 1999, Nourelfath & Niel 2004). Ainsi, des contrôleurs synthétisés sont implantés sur des systèmes flexibles de production (Lauzon *et al.* 1996, Ramirez-Serrano & Benhabib 2003), ou utilisés pour vérifier des propriétés de contrôlabilité (Music *et al*. 2002). Certaines approches d'implantation utilisent également les aspects de modularité (DeQueiroz & Cury 2002, Hellgren *et al.* 2002), permettant ainsi de se rapprocher de la structure en blocs fonctionnels d'un programme.

## *2.5. Conclusion*

Ayant constaté, à partir d'une analyse des travaux effectués par la communauté scientifique autour des HMS, qu'aucune méthode d'automatisation ne permettait de distribuer le contrôle dans le produit, nous avons montré comment il est possible de tirer parti des travaux relatifs à la structuration de la commande pour décliner le prédicat d'automatisation selon deux axes, *à l'instant t* et *à travers le temps*.

De plus, nous venons de montrer la pertinence des techniques de synthèse formelle pour permettre la génération automatique d'une commande sûre de fonctionnement. En ce sens, en nous basant sur les modèles définis dans la norme ISA/ANSI-95, nous allons utiliser les techniques de synthèse pour élaborer « hors-ligne » les règles de commande des différents équipements, et « en-ligne » les règles de contrôle personnalisé qui sont embarquées dans les produits.

Pour procéder à ces synthèses, il est nécessaire d'avoir déterminé au préalable des modèles formels des comportements des différents éléments du système, ainsi que des spécifications de comportement sous contrôle. L'interopérabilité, entre le contrôle par le produit de son routage *à travers le temps* et le contrôle des ressources du système de fabrication, est assurée par l'utilisation de modèles communs lors des phases de synthèse (Figure 47).

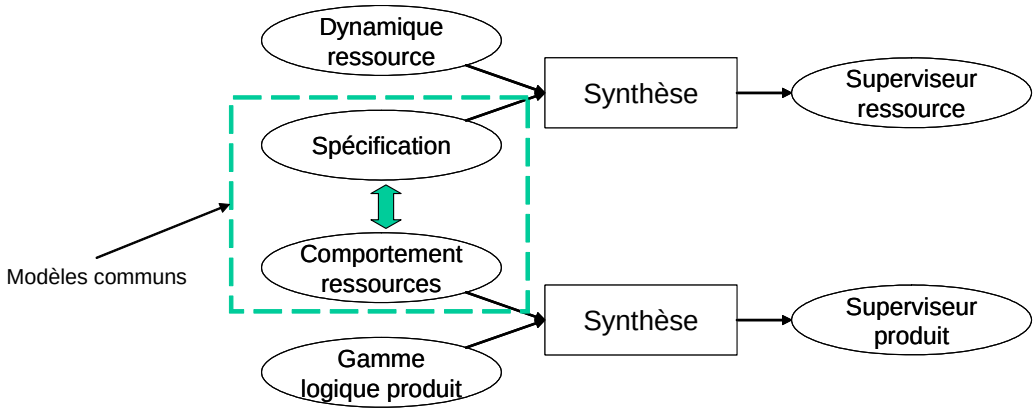



**Figure 47 : Interopérabilité assurée par l'utilisation de modèles communs**

La phase de synthèse nécessitant une phase préparatoire de modélisation, il nous a paru important de proposer un référentiel de modélisation des SCP permettant d'extraire de la manière la plus systématique possible, les modèles :

- de spécification du comportement des produits assurant leur production,
- de spécification du comportement des ressources assurant les opérations de transformation des produits.

Nous détaillons ce point dans le chapitre suivant.

# *Chapitre 3*

## Modélisation des systèmes contrôlés par le produit

# Chapitre 3 : Modélisation des systèmes contrôlés par le produit

## 3.1. Introduction

Ce chapitre a pour objet de proposer une méthode de modélisation des systèmes contrôlés par le produit, basée sur les objets de la norme ANSI/ISA-95, qui permette, en lien avec l'ingénierie produit/processus, de modéliser les procédés de fabrication des produits pour déterminer les modèles nécessaires à la synthèse des règles de contrôle des équipements et des règles personnalisées de contrôle par le produit.

Pour cela, les étapes de notre démarche sont :

- une modélisation des processus de fabrication des produits et une identification des ressources pouvant supporter ces processus,
- une identification des différents holons-produits dans les flux circulant entre les processus,
- une structuration des éléments de contrôle des holons-produits et des holons-ressources, permettant d'identifier leurs échanges,
- une extraction des spécifications comportementales des holons-produits et des holons-ressources.

Nous appliquerons cette démarche de modélisation à l'exemple de l'AIP, et nous utiliserons dans la suite ces modèles de spécifications pour faire la synthèse du contrôle par le produit des équipements et des trajectoires.

## 3.2. Modélisation des systèmes contrôlés par le produit

L'approche de modélisation des systèmes contrôlés par le produit que nous proposons se base sur une modélisation des processus de transformation physique que subissent les produits au cours de leur cycle de vie de fabrication. Dans les termes de la norme ANSI/ISA-95, ceci correspond à modéliser la suite des segments de processus (*process segment*s, correspondant aux *processus de transformation* dans notre approche) assurant la réalisation des segments de produit (*product segment*s) nécessaires à l'obtention d'un produit fini (*finished good*). La particularité de notre approche réside dans le fait que nous allons utiliser des objets spécifiques au contrôle par le produit ainsi qu'aux Systèmes Manufacturiers Holoniques (HMS), tels que le concept de *flux d'holons*. La Figure 48 représente l'organisation des différents éléments utilisés dans notre méthode de modélisation, que nous allons détailler dans ce chapitre.

Nous considérerons que :

- les processus de transformation sont assurés par des segments de processus ; les segments de processus, qui n'apparaissent pas dans la Figure 48, ne comprendront dans notre étude que d'une seule ressource ; une ressource peut assurer plusieurs

processus, et plusieurs ressources peuvent être capables d'assurer le même processus ;

- chaque ressource est un holon, c'est-à-dire qu'elle est capable de prendre une décision localement sur les opérations et processus à effectuer, tout en collaborant avec d'autres éléments dans un but global : fabriquer le produit. Par conséquent, chaque processus de transformation sera vu comme un ensemble de différents sous-processus, certains assurant la prise de décision, l'actionnement et l'observation des sous-processus de transformations morphologiques et/ou spatio-temporelles du produit ;
- les produits sont également des holons dans le sens où ce sont des entités composées d'une partie physique et d'une partie informationnelle (Figure 49), capable de prendre des décisions localement et de coopérer dans un but global, leur fabrication ;
- les produits circulent entre les processus pour former des flux de produits. Il est possible d'indiquer à quel flux appartient chaque produit.

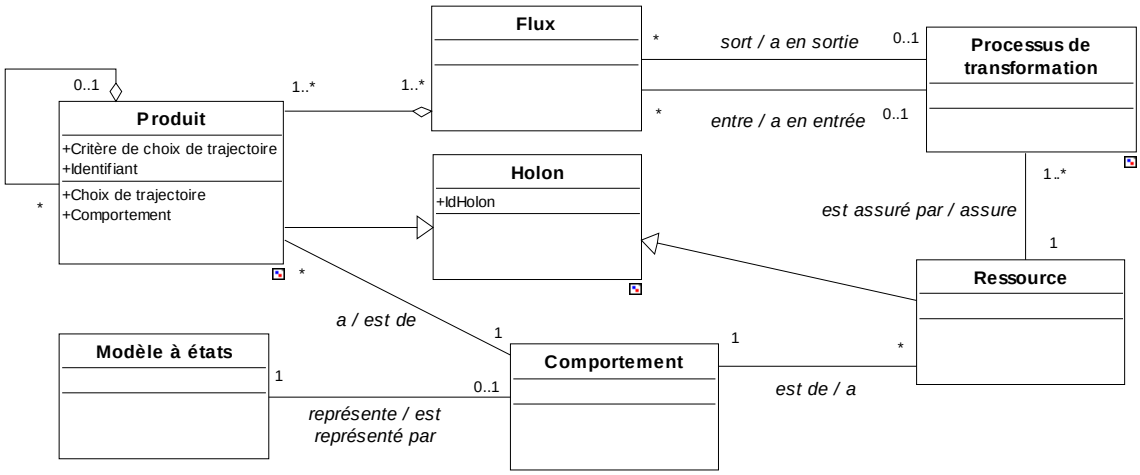



**Figure 48 : Objets utilisés dans notre approche et leurs liens**

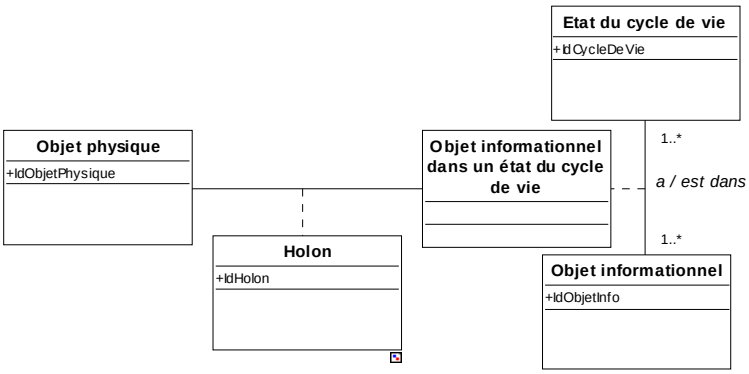



**Figure 49 : Composition d'un holon**

### *3.2.1. Représentation des flux circulant dans un système de production contrôlé par le produit*

Une manière simple d'appréhender le système de production est de représenter la séquence des différents segments de processus pour avoir une idée globale des flux circulant dans le

système de production. Plus particulièrement, pour appréhender la fabrication d'un type de produit particulier, il faut représenter la séquence des segments de produits successifs qui sont nécessaires à l'élaboration de ce produit. C'est le métier de l'ingénierie produit/processus de déterminer cette suite de segments de processus de transformations ainsi que les flux circulant dans le système de production (Figure 50).

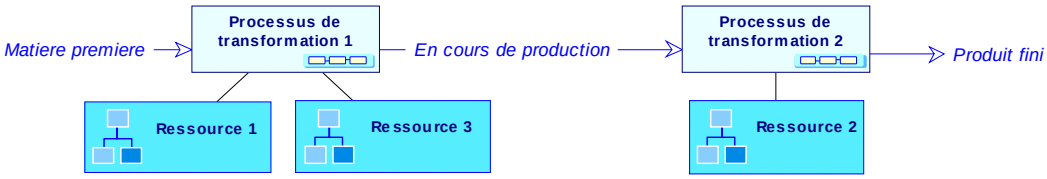



**Figure 50 : Exemple de suite de processus permettant la fabrication de produits**

La norme ANSI/ISA-95.00.02-2001 montre la possibilité de représenter les différents segments de processus, en fonction de leurs précédences (Figure 51).

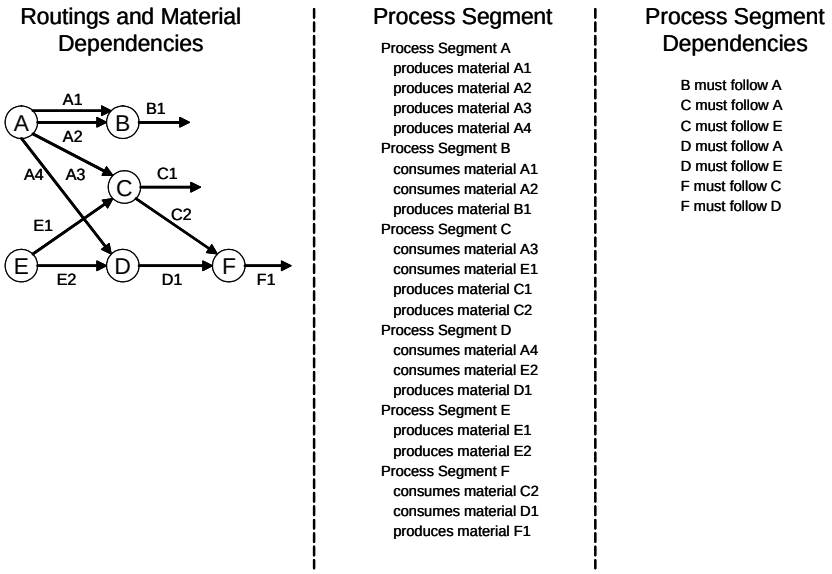



**Figure 51 : Routes des produits et dépendances matérielles**

Néanmoins, les informations sur le routage des produits peuvent apparaître avec les dépendances entre les segments de produits, ou entre les segments de processus. Il est possible à partir de ces liens de retrouver quelles sont les routes empruntées par les produits et les composants des produits (Figure 52). Le but de ces représentations n'est pas la traçabilité, dont le MES a la charge, mais plutôt les calculs nécessaires à la gestion de production.

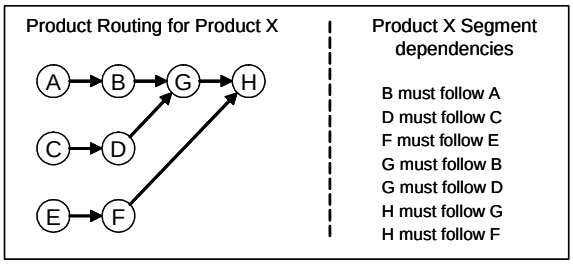



**Figure 52 : Routage pour un produit (ANSI/ISA-95.00.02-2001)**

Dans notre approche, les produits sont considérés comme étant des holons. La représentation des flux de produits et ou de matières premières s'apparente donc à une circulation d'holons. Nous adoptons une représentation spécifique pour que les flux d'informations, de matière et d'holons soient facilement différentiables. Pour cette raison, nous proposons trois représentations distinctes de ces types de flux (Figure 53). Cela permet de faciliter la compréhension des diagrammes représentant les différents processus d'élaboration des produits. Cette représentation sera utilisée tout au long de ce manuscrit.

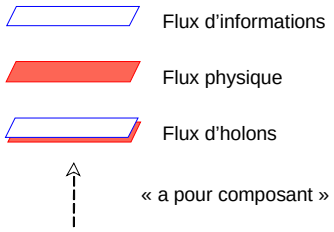



**Figure 53 : Différentes représentations pour différents types de flux**

Les produits contiennent donc une partie physique (dont la circulation pourra être détaillée sous forme de flux de matière) et une partie informationnelle (détaillée sous la forme de flux d'informations). Les processus, supportés par les ressources, seront capables de traiter l'un ou l'autre, ou les deux types de flux. Ils seront par exemple capables de traiter des ordres ou des requêtes contenus ou émis par un holon-produit (flux d'informations), et d'agir sur la partie physique de ce même produit (flux de matière) (Figure 54).

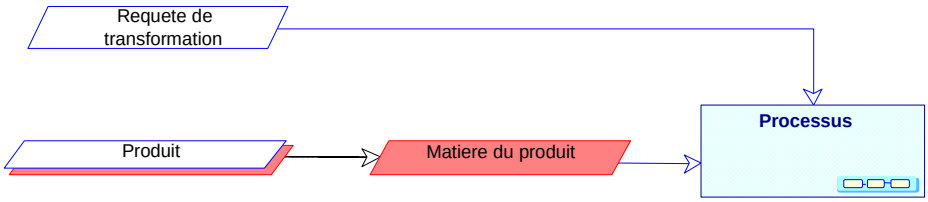



**Figure 54 : Les processus sont capables de traiter des flux de plusieurs types**

Dans le cadre des systèmes contrôlés par le produit, les diagrammes qui seront construits pour représenter les processus successifs permettant l'élaboration des produits prendront la forme d'un ensemble de processus entre lesquels circuleront des flux d'holons (Figure 55). Ces diagrammes représentant la circulation des flux dans le système serviront de base à la modélisation du comportement des holons-produits.

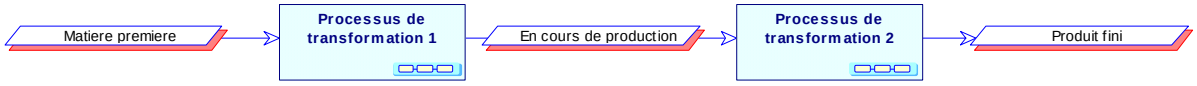



**Figure 55 : Circulation de flux d'holons entre les processus de fabrication contrôlés par le produit**

Nous avons vu plus haut que nous considérions l'holon-produit comme l'ensemble d'un objet physique et d'un objet informationnel. Les flux composés d'holons à un niveau conceptuel peuvent être amenés à être séparés (ou raffinés) en flux d'informations et flux de matière au niveau de l'implantation (Figure 56). En effet, il n'est pas toujours possible de maintenir de l'information sur le produit, notamment lors de processus de transformation de forme.

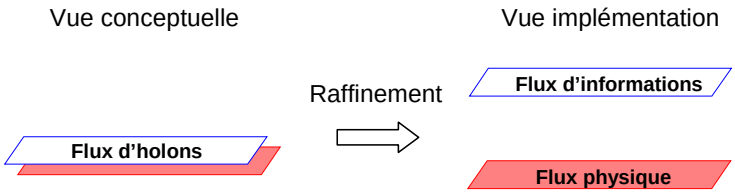



**Figure 56 : Raffinement des flux d'holons en flux d'informations et de matière**

## *3.2.2. Identification des holons-produits dans les flux*

Les holons-produits circulent à l'intérieur de plusieurs flux lors de leur cycle de vie de fabrication. Afin de pouvoir différencier les différents produits composant un flux, il est nécessaire de les identifier de manière unique. Pour ces raisons, nous proposons de préciser dans quels flux de produits se situe chaque holon-produit (Figure 57).

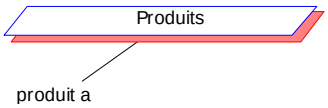



**Figure 57 : Le *produit a* est dans le flux *Produits***

Cette identification est nécessaire car dans le cas d'une production de type personnalisation de masse, chaque holon-produit est unique. Il faut donc pouvoir le suivre et l'identifier afin de savoir à quels flux successifs il appartient (Figure 58), pour assurer sa traçabilité, mais également sa production. En effet, cette identification permet d'extraire et de déterminer son comportement au cours de sa fabrication.

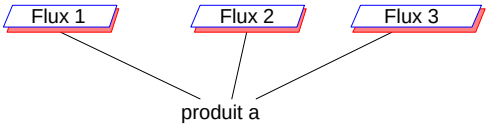



**Figure 58 : Repérage d'un produit dans les différents flux dans lesquels il circule lors de sa fabrication**

Les holons-produits identifiés dans les flux sont représentés par des objets. Ces objets, appartenant à des classes ont différents attributs (un identifiant propre, les informations concernant leurs composants, les processus subis, …) et différentes méthodes (comportement, algorithme de choix de trajectoire …) (Figure 59).

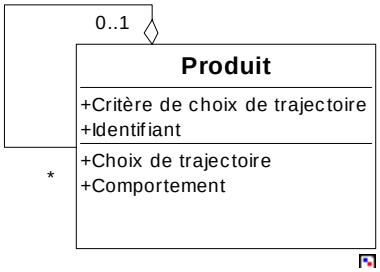



**Figure 59 : Classe représentant les produits**

### *3.2.3. Structuration des processus contrôlés par le produit*

Dans le cadre du contrôle par le produit, il est nécessaire d'adapter la structure interne de chaque processus. Pour aider le modélisateur dans sa démarche, nous proposons un modèle générique de structuration des processus de transformation, basé sur le principe de la boucle cybernétique (Lhote *et al.* 1999). Cette boucle inclut l'observation de la finalité pour la prise de décision (Figure 60). Dans notre cas, la finalité correspond à la transformation sur le produit.

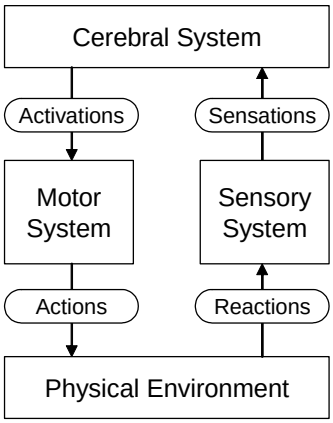



**Figure 60 : Boucle cybernétique appliquée à un système automatisé (Lhote *et al.* 1999)**

Nous utiliserons deux déclinaisons de cette boucle cybernétique, l'une pour le contrôle embarqué dans le produit, l'autre pour le contrôle des ressources.

#### 3.2.3.1 Boucle de contrôle par le produit

La première projection de cette boucle montre la structure de contrôle de la production par le produit (Figure 61).

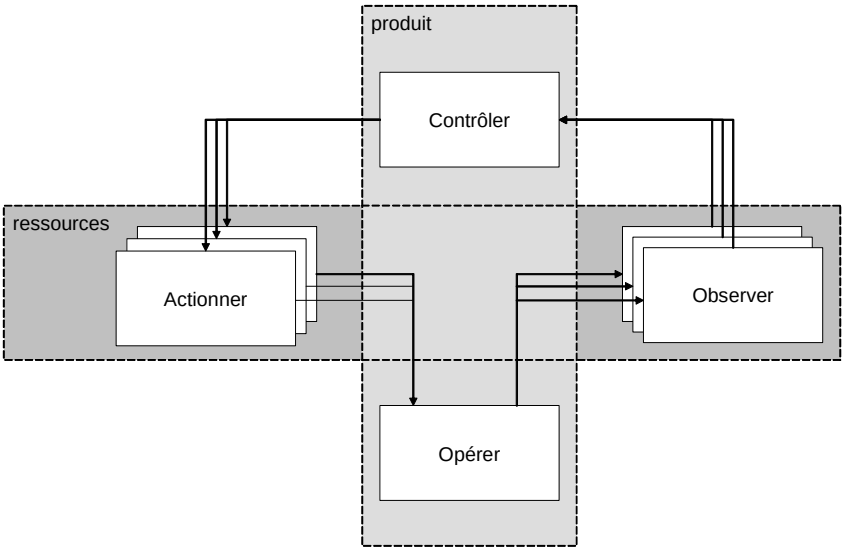



**Figure 61 : Boucle de contrôle par le produit**

Ainsi, le contrôle de la fabrication par le produit se décompose en :

- un sous-processus de contrôle implanté dans le produit qui assure le contrôle du routage sur les différentes ressources de production,
- un sous-processus d'actionnement réalisé par les ressources qui sont coordonnées par le produit,
- un sous-processus opératif correspondant au procédé de fabrication du produit,
- un sous processus observation des transformations du produit réalisé par les ressources du système.

### 3.2.3.2 Boucle de contrôle des ressources

De même, la structure des processus contrôlés par le produit, se décompose en (Figure 62) :

- un sous processus de contrôle : c'est lui qui va recevoir les requêtes émises par le produit, les traiter et qui va transmettre au produit sa nouvelle situation une fois la transformation observée ;
- un sous processus d'actionnement : c'est un transformateur de genre, qui transforme l'information transmise par le processus de contrôle en une action physique sur le produit ;
- un sous processus d'opération : il s'agit de la transformation morphologique, spatiale et/ou temporelle du produit ;
- un sous-processus d'observation de la finalité : c'est ce transformateur de genre qui observe la transformation physique et qui l'interprète sous la forme d'une information à destination du processus du produit de contrôle.

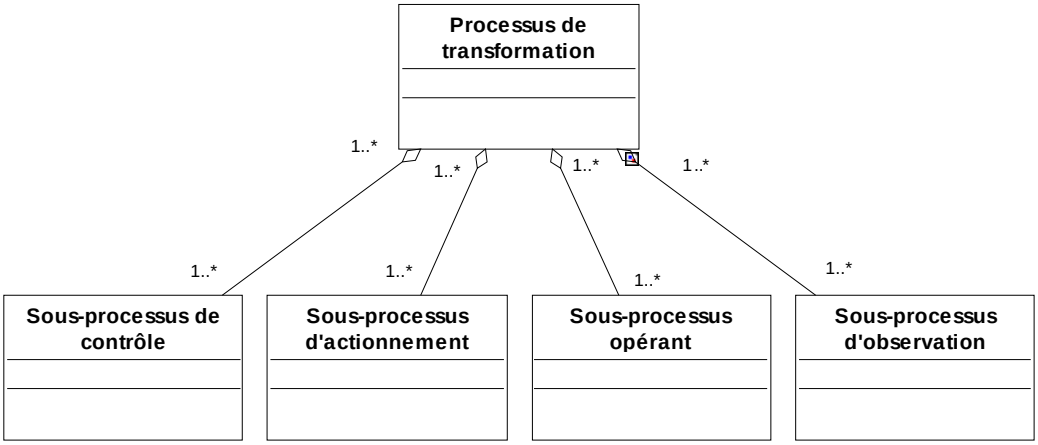



**Figure 62 : Sous-processus composant un processus**

Dans le cadre des systèmes contrôlés par le produit, ce sont les holons-produits qui vont émettre (ou contenir) les ordres ou requêtes de transformation (Figure 63). Les requêtes sont à destination des sous-processus de contrôle (« contrôler ») des processus de transformation. Les sous-processus de contrôles interprètent cette requête sous la forme d'une requête d'action à destination du sous-processus d'actionnement (« actionner »). Ce dernier va transformer l'information en une action physique qui va conduire les différents effecteurs à « opérer » la transformation sur l'holon-produit. Cette transformation est observée par le sous-processus d'observation (« observer ») qui transforme cette observation en une information à destination du sous-processus de contrôle. Le processus de contrôle met à jour l'information d'état de l'holon-produit, ou l'informe de la fin de la transformation.

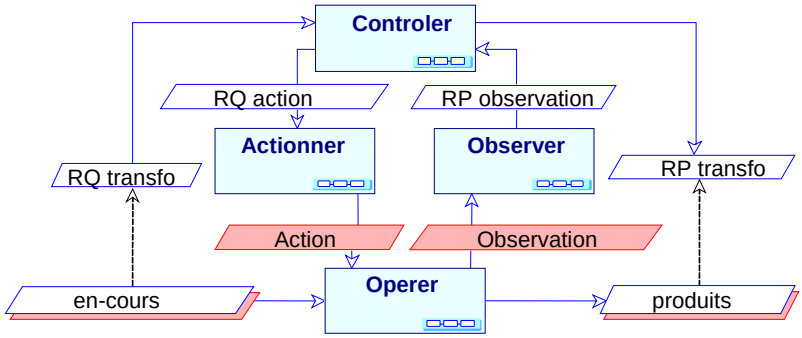



**Figure 63 : Structure générique des processus contrôlés par le produit**

Cette structure est générique, et elle peut s'appliquer de manière fractale (Bongaerts 1998) (ou itérative) à tout processus, voire aux sous-processus eux-mêmes. En effet, le processus d'actionnement est structuré de cette façon : il intègre un processus de contrôle, un processus d'actionnement, d'opération, et d'observation du résultat de l'opération. Elle peut de plus être adaptable, dans le sens où toutes les ressources ne disposent pas d'une possibilité d'observer les résultats de la transformation.

Vus de l'extérieur, et notamment du point de vue du produit, les sous-processus de contrôle des processus reçoivent des requêtes (notées RQ), et émettent des comptes-rendus concernant la situation du produit (notés RP) (Figure 64).

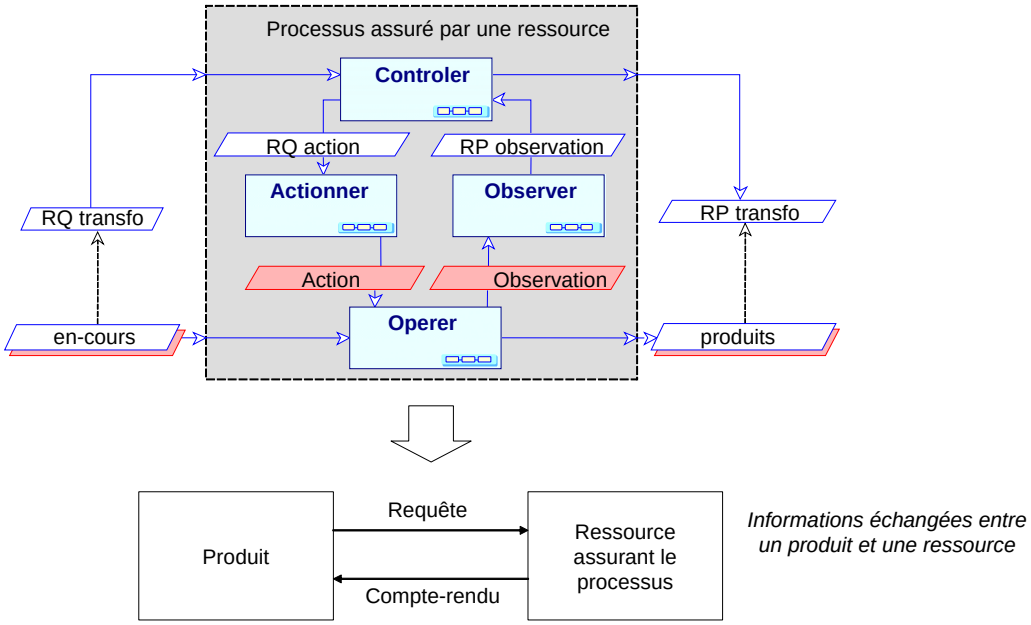



**Figure 64 : Echanges produit - ressources**

Ces informations, qui peuvent n'être que des événements, sont organisées suivant une séquence définissant le contrôle des opérations élémentaires. Cette dernière, dans la définition donnée par Vogel (1988), est composée de trois actèmes (Figure 65) :

- ouverture de la séquence : préparation des ressources, et de l'objet destinataire du noyau de la séquence ;
- noyau de la séquence : réalisation des événements et des transformations de la séquence ;
- clôture de la séquence : libération des ressources.

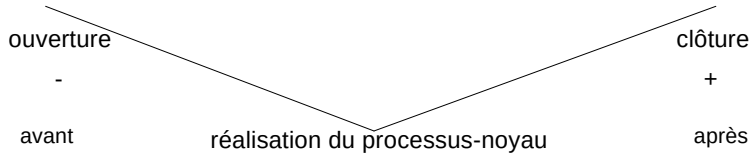



**Figure 65 : Définition d'une séquence selon Vogel (1988)**

Dans notre cas appliqué au contrôle par le produit, cette séquence est définie par (Figure 66) :

- une ouverture qui correspond à une requête émise par le produit à destination du sous-processus de contrôle de la ressource,
- un noyau géré par le sous-processus de contrôle correspondant à l'émission de commandes à destination du processus d'actionnement, et à la réception d'informations du sous-processus d'observation ; ce noyau n'est pas vu par le produit, puisqu'il correspond au contrôle des ressources qui assurent les processus de transformation,
- une clôture qui correspond à l'émission d'un compte-rendu de fin de transformation à destination du produit.

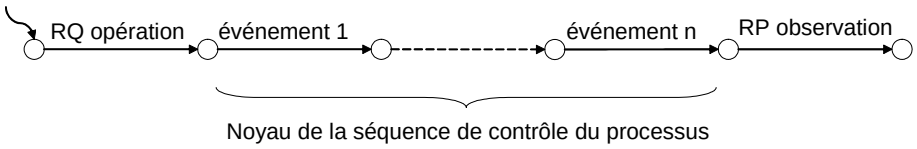



**Figure 66 : Les séquences de contrôle des processus débutent par une requête émise par le produit et s'achèvent par un compte-rendu transmis au produit**

La définition de cette séquence doit se retrouver dans l'écriture des spécifications de commande des différentes ressources assurant les processus de transformation. Nous reprendrons cet aspect dans le chapitre 4. Ce noyau peut être lui aussi organisé sous la forme d'une séquence imbriquée dans la séquence globale, comportant des phases de préparation et de clôture, ou sous la forme d'une séquence enchevêtrée à la séquence globale si les phases de préparation et de clôture de ce noyau sont avant ou après l'ouverture et la séquence globale (Figure 67) (Vogel 1988).

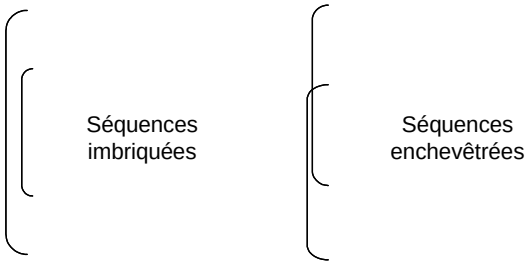



**Figure 67 : Imbrication et enchevêtrement de séquences (Vogel 1988)**

Jusqu'ici, nous nous sommes principalement intéressés à modéliser les aspects statiques de la structure du contrôle par le produit. Nous allons maintenant nous pencher sur la modélisation des aspects dynamiques des différents processus qui vont être utiles pour les phases de synthèse.

## *3.3. Extraction des modèles de comportement*

Les buts de cette phase de modélisation des processus de transformation sont :

- d'une part d'appréhender le problème de la fabrication de produits dans le cadre de systèmes contrôlés par le produit,
- d'autre part de formaliser le problème du contrôle par le produit, c'est-à-dire de modéliser le comportement des produits et des ressources contrôlées par le produit.

En effet, pour résoudre les équations d'automatisation que nous avons définies plus tôt (chapitre 2) avec le point de vue du contrôle par le produit, nous avons besoin de différents modèles :

- un modèle de ce que réalisent les ressources (*process segment*),
- un modèle de la suite des opérations que doit subir le produit (*product segments dependency*).

### *3.3.1. Modèles des ressources assurant les processus*

Par « modèle des ressources », nous voulons désigner le modèle formel, sous forme d'un automate à états finis par exemple, de ce que permet de faire une ressource assurant un processus, avec le point de vue du contrôle par le produit.

En ce sens, nous modélisons le comportement des ressources vu des produits, à partir des échanges entre les produits et les ressources. Ainsi, nous pouvons représenter l'interaction entre un produit et le contrôle d'une ressource, lors d'une opération ou d'un processus, par une succession d'une requête et d'un compte-rendu (Figure 68).

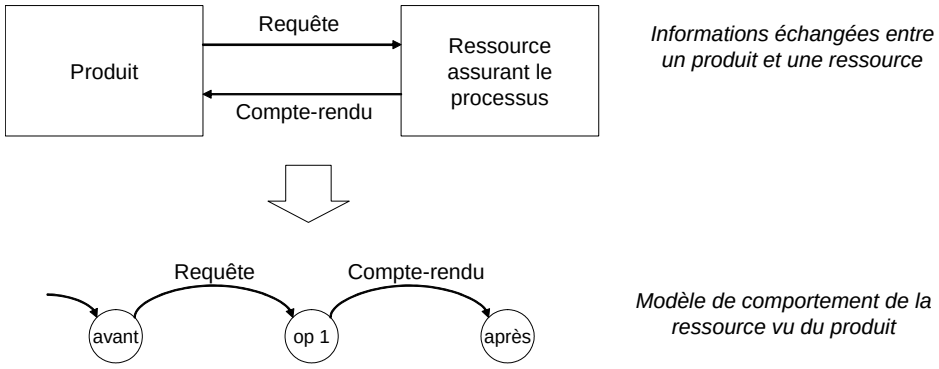



**Figure 68 : Modélisation de l'interaction produit – ressource**

L'état OP1 correspond en réalité à l'ensemble des états de la ressource assurant le processus de transformation. Il s'agit en quelque sorte d'un « macro-état » (Figure 69), dont les événements internes ne sont pas vus par le produit car ils correspondent à des événements internes au contrôle de la ressource. Ces événements définissent en réalité le noyau de la séquence de contrôle de la ressource permettant de réaliser le processus, en d'autres termes le modèle de comportement du sous-processus de contrôle d'un processus.

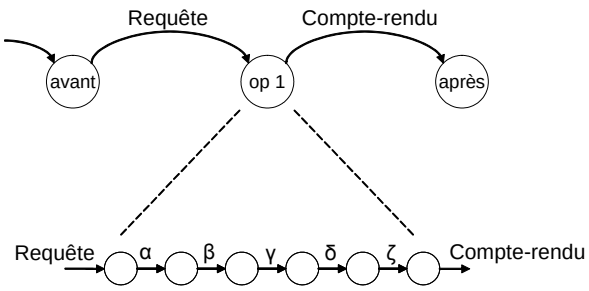



**Figure 69 : L'état "op 1" correspond à un ensemble d'états non vus par le produit**

Pour modéliser les comportements des différents équipements, nous allons utiliser ce type de séquences comportant une alternance de requêtes et de comptes-rendus, que nous organiserons en fonction de la structure et du type de la ressource.

Afin de systématiser la démarche de modélisation, nous proposons des modèles de postes, à l'instar de Munerato (1988), les plus génériques possibles. Nous nous basons pour cela sur des définitions de processus fournies par la théorie du système général (Le Gallou et Bouchon Meunier 1992) pour classer les ressources en trois « familles » selon la nature des processus qu'elles assurent :

- les processus de forme : ressources assurant les transformations morphologiques des produits,
- les processus de temps : ressources assurant le stockage des produits,
- les processus d'espace : ressources assurant le transport des produits.

Pour les deux premiers types de processus, nous devons identifier quelles sont les opérations réalisables. Pour cette raison, nous cherchons à modéliser les états dans lesquels la ressource est libre (au repos), ainsi que les états représentant les différentes opérations qu'elle peut réaliser. Une ressource pouvant assurer plusieurs processus de transformation ou de stockage sera vue comme une fusion des différents modèles de chaque opération. Dans ce sens nous représentons une ressource assurant *n* processus ou opérations, par un automate à *n + 1* états (Figure 70) :

- la ressource sera considérée *libre* initialement,
- la ressource est *libre* ou occupée à faire l'opération *OPi* ($i \in \{0,\ldots,n\}$),
- elle passe de l'état *libre* à l'état *OPi* lorsqu'un produit lui fait une requête pour subir l'opération *OPi*,
- elle passe des états *OPi* à *libre* lorsqu'elle a émis un compte-rendu d'observation que la transformation du produit a bien été achevée,
- l'état *libre* sera un état marqué dans le sens où il constitue la fin des différentes séquences de transformation, autrement dit un état « stable » du système.

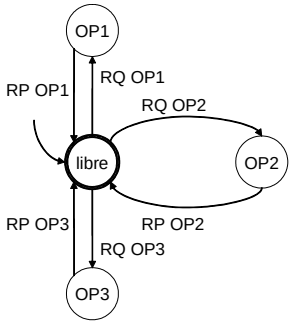



**Figure 70 : Exemple de modèle d'une ressource capable de réaliser 3 processus (4 états)**

Dans le cas d'une ressource de ce type, nous ne considérons qu'un seul état stable correspondant à l'état « libre ». En effet, à la suite de toutes les opérations qu'elle peut assurer, une ressource de transformation revient à son état initial « libre ».

En revanche, lorsqu'elles ont effectué un mouvement pour réaliser une opération de déplacement, nous considérons que les ressources de transport sont dans une nouvelle position, et donc dans un état différent de l'état précédant l'opération. En ce sens, nous obtenons plusieurs états stables pour les ressources de transport, qui correspondent à l'ensemble des positions qu'elles sont capables d'atteindre (Figure 71).

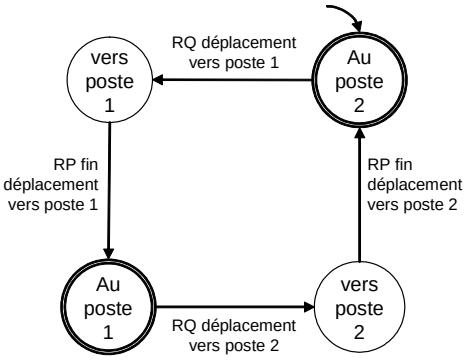



**Figure 71 : Modèle de ressource de déplacement**

## *3.3.2. Modèle des processus nécessaires à la fabrication du produit*

La suite des segments de produit successifs (Figure 72) qui sont nécessaires à la fabrication d'un produit correspond en quelque sorte à la spécification comportementale de ce produit. Cette dernière peut être représentée sous la forme d'un automate à états finis. De la première phase de modélisation, nous avons obtenu la suite des différents processus nécessaires à la fabrication d'un produit (représentation des flux circulant entre les processus + appartenance d'un produit aux différents flux). Chacun de ces processus est structuré en sous-processus selon le modèle générique que nous proposons (Figure 63), basé sur la boucle cybernétique.

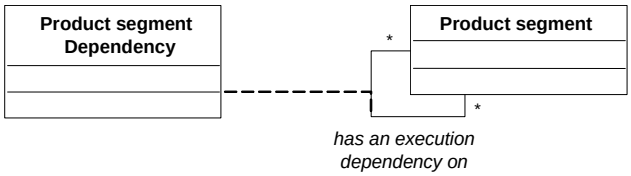



**Figure 72 : Succession des segments de produit (extrait de ANSI/ISA-95)**

Si l'on considère ces deux premières phases de modélisation, il est possible d'obtenir la représentation des informations circulant entre chaque holon-produit et les sous-processus de contrôle (Figure 73). Il s'agit en quelque sorte d'un « zoom » à l'intérieur de chaque processus pour déterminer les différentes interactions entre les holons-produits et les processus et sous-processus.

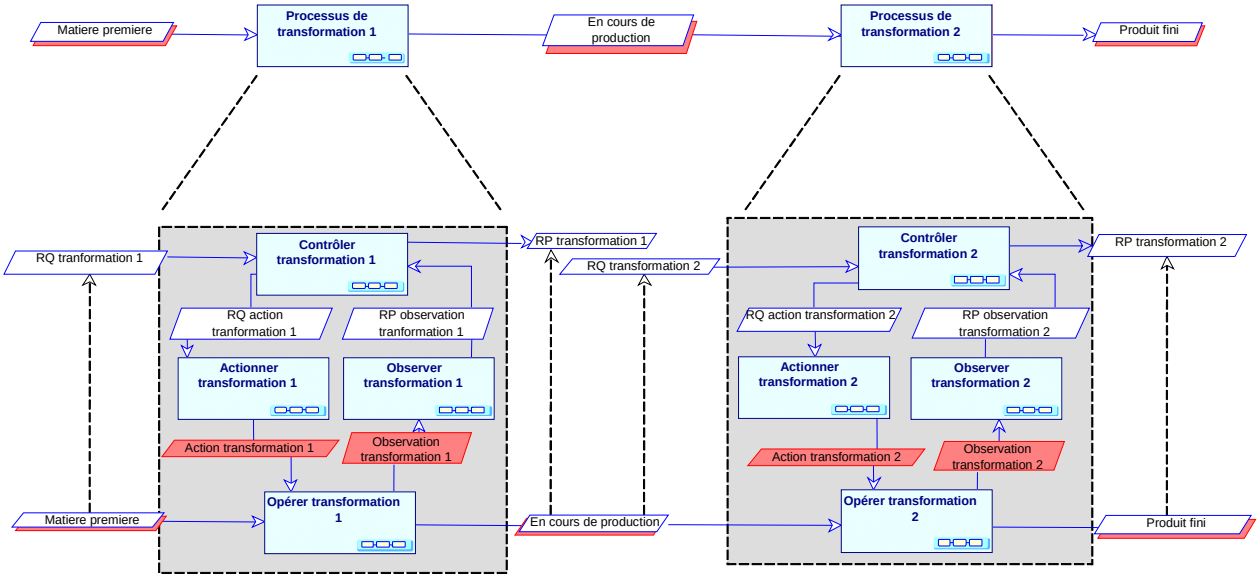



**Figure 73 : Zoom sur la suite des processus, faisant apparaître les informations échangées entre le produit et les ressources**

A partir de ces informations il est possible, en ne considérant que les comptes-rendus qui sont retransmis au produit après transformation, de modéliser, d'un point de vue du contrôle par le produit, les spécifications comportementales de chaque produit, sous la forme d'une « séquence logique » (Bigand *et al.* 2004). Nous pouvons formaliser le modèle de spécifications d'un produit en regardant :

- dans quels flux il apparaît (ceci doit être fait lors de la phase d'identification des objets dans les flux) ;
- quels sont les comptes-rendus des transformations que doit subir le produit pour être fabriqué.

Ainsi, si nous prenons l'exemple de la Figure 73, en considérant un produit qui circule successivement dans le flux de matière première, d'encours de production puis de produits finis, nous observons que ce produit est obtenu par deux transformations successives (sans assemblage, désassemblage ou séparation). A partir des différents flux d'informations, nous pouvons déduire un modèle sous la forme d'un automate à états finis qui représente la suite des comptes-rendus de transformation du produit (Figure 74).

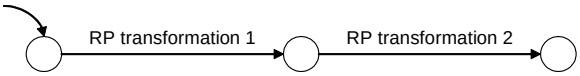



**Figure 74 : Automate à états représentant les transformations successives du produit**

Cet automate correspond, d'un point de vue du contrôle par le produit, à la spécification à respecter, c'est-à-dire la *gamme de fabrication du produit*. Il s'agit ici d'une *gamme logique*, par opposition à une *gamme opératoire* :

- **gamme logique** : « décrit le séquencement (contraintes d'ordre) des opérations élémentaires et caractéristiques définissant ainsi le processus de fabrication qui permet d'élaborer le produit fini à partir de son état brut » (Cruette 1991) ;
- **gamme opératoire** : « décrit le séquencement des différentes transformations, fonctionnelles et positionnelles [du produit] faisant ainsi apparaître la succession des lieux physiques sur lesquels il transite » (Amar *et al.* 1992).

Cette gamme logique peut présenter de la flexibilité dans le cas où l'ingénierie produit/processus n'impose pas de relation de précédence entre deux processus (Figure 75), à l'image de l'exemple présenté par Bigand *et al.* (2003).

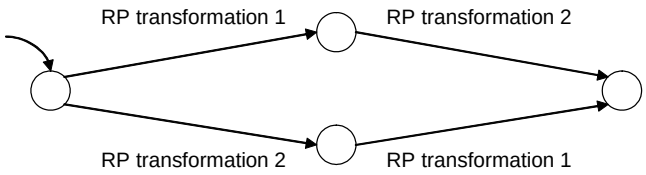



**Figure 75 : Possibilité de flexibilité dans la modélisation des spécifications des produits**

En cas de *désassemblage*, ou de séparation, les entités entrant dans le processus ne sont plus les mêmes que celles qui en sortent. Pour cette raison, un automate décrira le cycle de vie de fabrication de la première entité, et un autre automate celui de la seconde entité. Le compte-rendu de la transformation correspondra, pour l'élément désassemblé, au dernier événement de son cycle de vie, et pour les éléments résultants, à l'événement de création (Figure 76).

**Figure 76 : Séparation (fin de vie) d'un produit en deux composants (début de cycle de vie)**

Dans le cas d'un *assemblage*, il est possible de considérer le produit comme « virtuel » au départ, c'est-à-dire ayant seulement une partie informationnelle (par exemple l'ordre de fabrication), mais pas encore de partie physique. Cet assemblage sera construit au fur et à mesure de la progression de la fabrication. Par exemple, sur la Figure 77, on peut voir le modèle des processus de fabrication de l'*assemblage a*, cette entité apparaissant dans les flux d'*ordres de fabrication*, d'*en cours* et de *produits finis*.

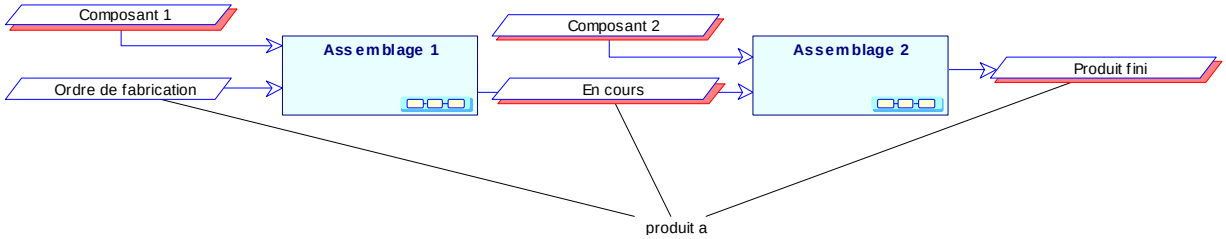



**Figure 77 : Exemple de processus d'assemblage d'un produit *a***

A partir de la structure interne des différents processus d'assemblage (cf. paragraphe 3.2.3), on peut extraire le modèle de spécification de l'assemblage a, en d'autre termes, le modèle de son comportement attendu durant son cycle de vie de fabrication. Dans cet exemple, le modèle de spécifications du produit est représenté par un automate à trois états et deux transitions (Figure 78).

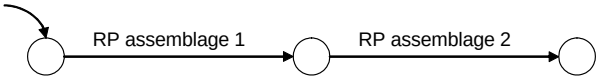



**Figure 78 : Modèle de spécification de la fabrication d'un assemblage**

## *3.4. Application à l'exemple de l'AIPL*

Pour illustrer notre propos, nous allons maintenant appliquer cette démarche de modélisation à l'AIPL pour extraire les différents modèles nécessaires à la synthèse du contrôle par le produit : modèle de spécification des produits, et modèle du comportement des ressources contrôlées par le produit.

### *3.4.1. Détermination du modèle de spécification d'un produit*

La première phase de la démarche consiste en la modélisation du procédé de fabrication des produits de type AIP (voir Figure 20 au chapitre 1), avec le point de vue du contrôle par le produit. Nous nous intéressons plus particulièrement ici au processus d'assemblage d'un produit 01-09 réalisé par le Système Flexible de Production.

Pour fabriquer un produit 01-09 (voir Figure 20 au chapitre 1), portant la référence *ref 0455*, il faut procéder à deux assemblages successifs. Ainsi, il sera (Figure 79) :

- tout d'abord virtuel, dans le sens où il s'agira d'un ordre à exécuter (*produit 01-09 à faire*),
- à l'état d'en-cours de fabrication, après que sa production ait été commencée (*produit 01-09 en cours*),
- fini une fois que tous les assemblages auront été effectués (*produit 01-09 fini*).

Ainsi, un produit de ce type 01-09 appartient successivement aux flux de produit 01-09 à faire, en cours et fini (Figure 79). Dans le cas d'une production de pièces uniques, les flux ne sont composés que d'un seul élément.

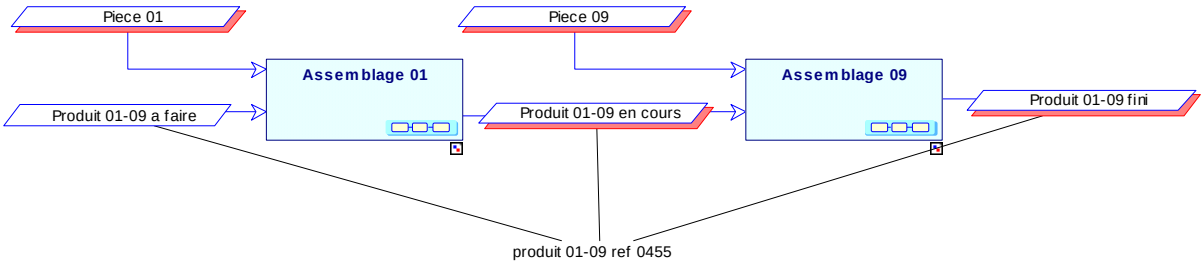



**Figure 79 : Le produit 01-09 ref 0455 appartient successivement à différents flux au cours de son processus d'assemblage**

Le *produit 01-09 ref 0455*, appartenant successivement à ces trois flux, est donc modifié par les différents processus. Pour cette raison, il aura comme modèle de spécifications de comportement un automate à états représentant la succession des comptes-rendus de transformation (Figure 80).

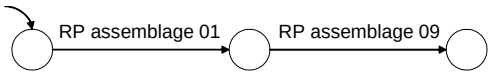



**Figure 80 : Modèle de spécification du produit 01-09 ref 0455**

### *3.4.2. Détermination des modèles des ressources contrôlées par le produit*

Comme nous l'avons vu au paragraphe 3.3.1, les modèles des ressources, au niveau du produit, sont vus sous une forme générique simple. Seuls les événements correspondant aux requêtes et comptes-rendus de transformation interviennent.

Si nous continuons à nous intéresser aux processus d'assemblage, notamment ceux permettant d'assembler des pièces de type 01 et 09 pour former les produits, le même modèle générique est appliqué afin de modéliser leur structure interne (Figure 81).

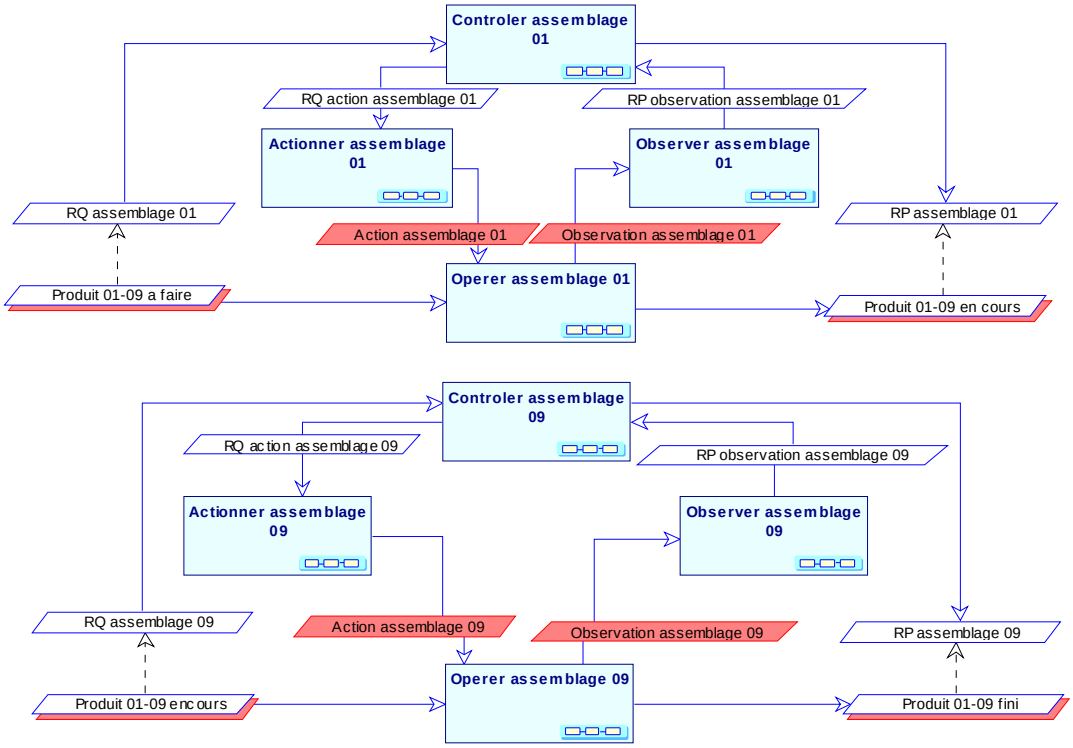



**Figure 81 : Modèles de la structure interne des processus d'assemblage 01 et 09**

Cette structure interne montre quels sont les échanges qui sont opérés entre les produits et les ressources, notamment au niveau des événements de contrôle des ressources par les produits. Ainsi, une ressource assurant le processus d'assemblage 01 aura dans son modèle les événements « RQ assemblage 01 » et « RP assemblage 01 ».

Dans le cas de l'AIP, l'assemblage est réalisé par un Système Flexible de Production, composé de différents postes, les produits étant transportés entre ces postes sur les palettes d'un convoyeur. Chacun de ces postes est capable d'assurer tout ou partie des assemblages nécessaires à la fabrication des produits finis.

Prenons par exemple le cas du poste 4. Ce poste est capable d'assembler à l'aide de son manipulateur des pièces de type 09 et de type 10, dont il dispose en magasin, sur les produits qui en auront besoin. Les processus d'assemblage des pièces 09 et 10 seront structurés selon notre structure générique. Pour cette raison, le modèle du poste 4, capable d'assurer ces deux processus, sera un automate à 3 états. Le poste 4 passera de son état initial *libre* aux états

représentant les états dans lesquels un assemblage est réalisé par la réception d'une requête, pour y revenir après avoir émis un compte-rendu de fin de transformation (Figure 82).

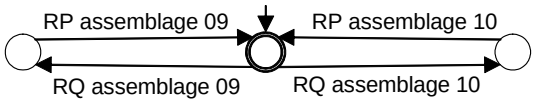



**Figure 82 : Modèle du poste 4 capable d'assurer les assemblages de pièces 09 et 10**

En ce qui concerne le modèle du convoyeur du SFP, nous obtenons un modèle de l'ensemble des trajectoires possibles entre les postes (Figure 83). Ce modèle représente les déplacements possibles à l'aide du convoyeur sur le SFP, en considérant le poste 0 comme initial, les postes 1 et 3 « hors fonctionnement » car n'ayant plus de pièces en magasin (il est donc inutile de les prendre en compte dans la synthèse des trajectoires de production), et que donc seuls les postes 0, 2, 4 et 5 sont accessibles.

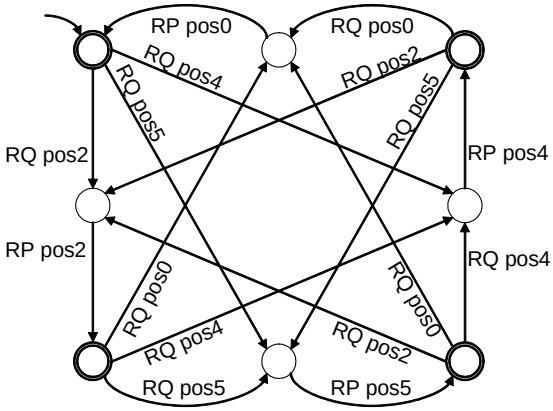



**Figure 83 : Modèle du comportement du convoyeur**

## *3.5. Conclusion et perspectives sur la méthode de modélisation*

Nous venons de proposer une méthode de modélisation des systèmes contrôlés par le produit permettant de formaliser les modèles nécessaires à la synthèse du contrôle par le produit des ressources et des trajectoires de production (Figure 84).

Cette approche a partiellement été implantée dans l'atelier de génie logiciel MEGA, dont nous avons modifié le métamodèle afin d'insérer des éléments propres aux systèmes contrôlés par le produit, tels que le concept de flux d'holon ou d'objet discret appartenant à un flux. Le modèle générique de la structuration des processus n'est pas encore implanté, de même que les mécanismes qui permettraient d'extraire automatiquement les modèles à états des produits et des ressources à partir des modèles de processus. Ils feront l'objet de prochains développements.

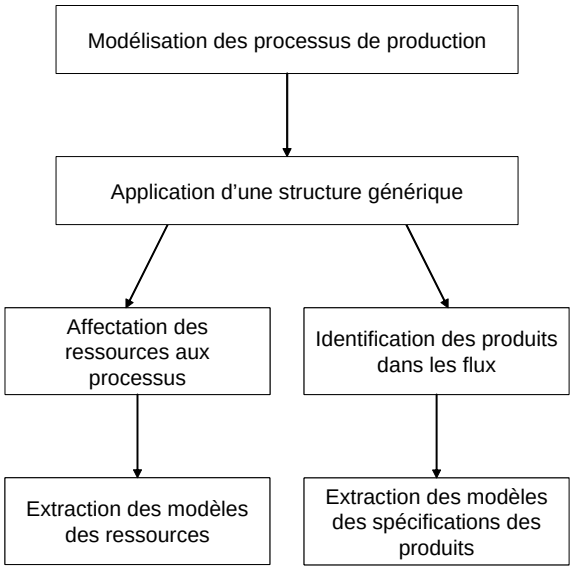



**Figure 84 : Méthode de modélisation des systèmes contrôlés par le produit permettant l'extraction de modèles formels de comportement**

Cette méthode nous permet d'obtenir différents modèles de la structure des processus, du comportement des ressources (avec le point de vue du contrôle par le produit) qui vont les assurer, ainsi qu'une spécification du comportement de chaque produit. Les différents modèles obtenus vont nous servir de base dans les deux chapitres suivant pour déterminer, par synthèse automatique (Figure 85) :

- « hors ligne » les règles de commande des différents équipements ;
- « en ligne » les règles de contrôle personnalisé qui sont embarquées dans les produits.

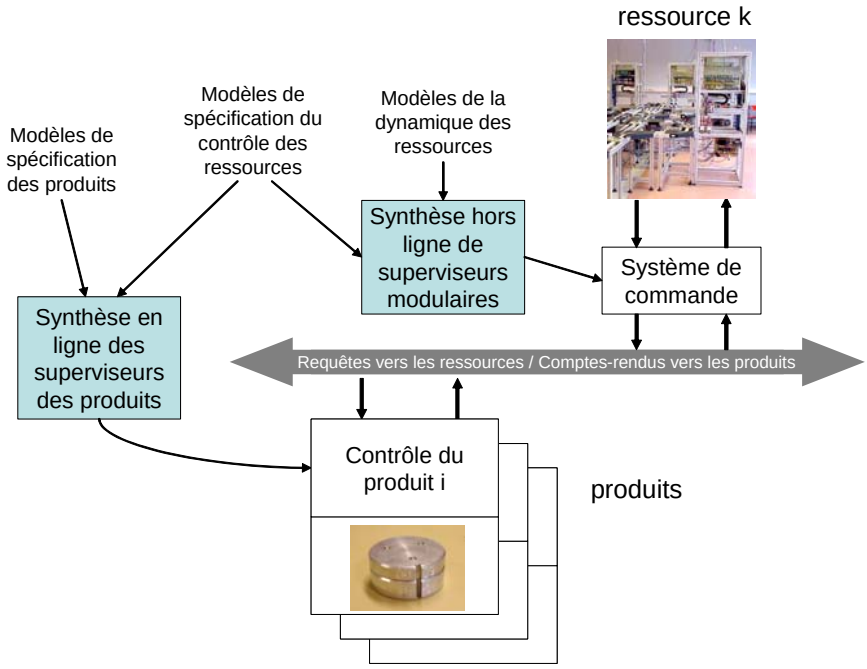



**Figure 85 : Utilisation des modèles dans les phases de synthèse**

# *Chapitre 4*

## Synthèse de la commande des systèmes contrôlés par le produit

# Chapitre 4 : Synthèse de la commande des systèmes contrôlés par le produit

## *4.1. Introduction*

Ce chapitre a pour objet de présenter une approche de génération du contrôle des équipements d'un système de production automatisé contrôlé par le produit.

Notre contribution à la résolution des problèmes de modélisation identifiés au chapitre précédent repose en partie sur la mise en œuvre d'une approche modulaire de synthèse (Gouyon *et al.* 2002) (Gouyon *et al.* 2003-1) (Gouyon *et al.* 2004-1). Notre proposition consiste à utiliser, sur un système structuré à l'aide d'objets d'automatisation, les techniques de synthèse formelle pour générer le superviseur associé à chacun de ces objets, et ce à partir de descriptions de leurs services et de modèles caractérisant les ressources (équipements technologiques et/ou objets d'automatisation de niveau inférieur) dont ils disposent.

Une fois ces superviseurs modulaires obtenus par synthèse formelle, nous proposons des mécanismes permettant leur interprétation et leur implantation sous la forme de contrôleurs utilisables sur une architecture de commande répondant à des critères de flexibilité, d'interopérabilité ou de réutilisation (Pétin *et al.*, 1998)

La commande de ces ressources sera structurée en fonction de la structure physique du procédé à contrôler, mais également de façon à ce que le module de commande de plus haut niveau (niveau produit) soit capable de traiter une requête d'opération à réaliser sur le produit, puis de renvoyer un compte-rendu de tâche accomplie sur le produit (fin d'opération sur le produit) (Figure 86).

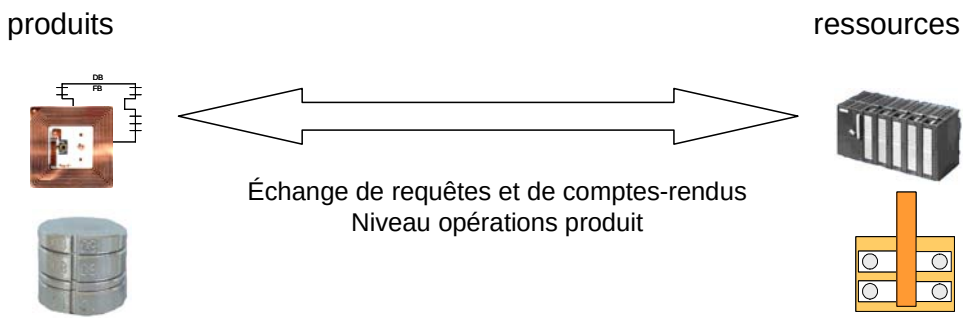



**Figure 86 : Echange de requêtes et de comptes-rendus entre les produits et les ressources**

La cohérence entre les informations traitées par les produits et celles de plus haut niveau des ressources est assurée par la construction des processus selon le modèle de référence que nous avons proposé dans le chapitre 3 (Figure 87).

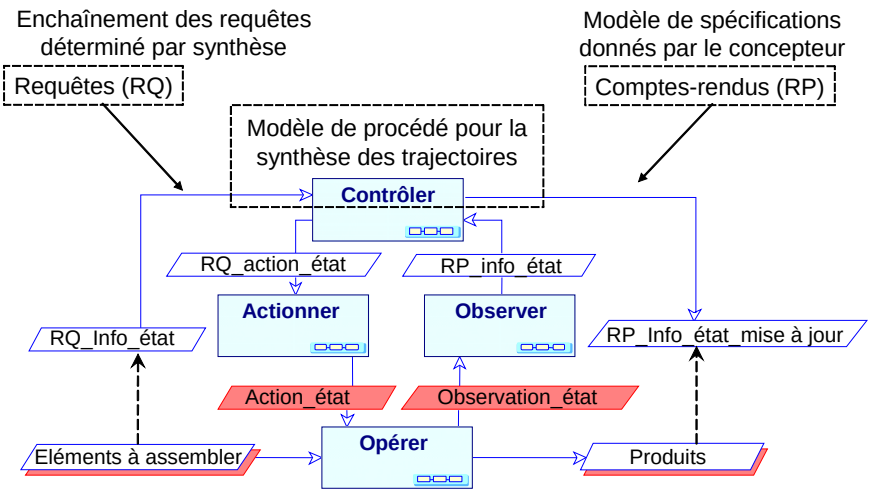



**Figure 87 : Cohérence assurée par structuration des processus selon un modèle de référence**

## *4.2. Méthode de synthèse structurée et d'implantation des contrôleurs*

### *4.2.1. Synthèse de superviseurs modulaires*

#### 4.2.1.1 Principe de la synthèse structurée de la commande

La démarche que nous proposons permet de synthétiser une architecture hiérarchique coordonnée de superviseurs, basée sur la structure physique modulaire du système à commander.

Notre approche combine les aspects d'itérations proposés par les méthodes d'automatisation orientées objet et les techniques de synthèse modulaires :

- les critères utilisés pour structurer le système de commande ne sont pas seulement guidés par la réduction du phénomène d'explosion de l'espace d'états (De Queiroz & Cury, 2002) et la recherche d'une structure optimale qui minimise les intersections entre alphabets ; ils sont plutôt orientés vers la recherche d'une véritable méthodologie de structuration basée sur la structure physique du procédé lui-même ; cela conduit à une démarche de conception itérative de type « bottom-up », démarrant au niveau des équipements de terrain,
- des algorithmes de synthèse (Wonham & Ramadge 1987) seront utilisés pour générer automatiquement les superviseurs associés à chaque module (ou objet d'automatisation) de l'architecture de commande ; pour un module donné, le superviseur sera synthétisé à partir d'un modèle de spécification décrivant les missions allouées à ce module et à partir d'un modèle du procédé donné par les superviseurs de niveau inférieur (cette démarche itérative sera récapitulée dans la Figure 100).

A l'image des "filtres de comportement", ces superviseurs doivent assurer un certain ordre d'occurrence des événements dans les modules supervisés, en filtrant des observations et des requêtes fonctionnelles afin de séparer les aspects fonctionnels des aspects relatifs à la technologie du système, et ainsi garantir un certaine cohérence avec un comportement attendu (spécifié).

Nous appliquons une démarche méthodologique de structuration des systèmes automatisés pour, d'une part, procéder à la synthèse récursive des superviseurs modulaires et, d'autre part, faciliter l'implantation de ces superviseurs sur des architectures de commande programmées au travers des langages actuels à base de blocs fonctionnels, tels que ceux de la norme IEC 61131-3.

#### 4.2.1.2 Synthèse des superviseurs du niveau le plus bas (noté niveau 1)

Au plus bas niveau de la structure des systèmes de production se trouvent les Eléments de Partie Opératives (EPO). La première étape de notre approche va donc consister en la synthèse de superviseurs de « bas-niveau », ne contrôlant chacun qu'un seul EPO. Les modèles nécessaires à la synthèse d'un superviseur sont :

- d'une part, un modèle de l'EPO à contrôler,
- d'autre part, un modèle de spécifications du comportement de l'EPO contrôlé.

Ces modèles sont écrits dans le formalisme des automates à états finis. Les modèles d'EPO représentent les états physiques de ces EPO, et les modèles de spécifications vont représenter les états admissibles du système contrôlé.

Par l'utilisation d'algorithmes de synthèse « classiques », tels que ceux proposés par Wonham & Ramadge (1987) et par Kumar & Garg (1995), nous pouvons synthétiser les différents superviseurs associés aux différents EPO, de niveau 1 (Figure 88).

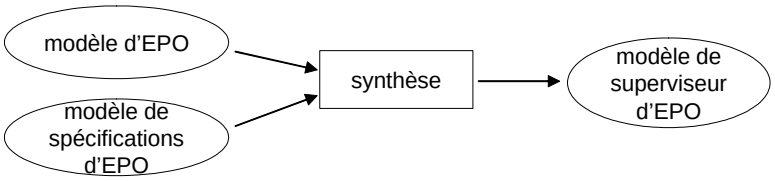



**Figure 88 : Synthèse d'un superviseur de niveau 1**

#### 4.2.1.3 Démarche récurrente

Nous venons de montrer comment synthétiser des superviseurs de niveau 1. La phase suivante va nous permettre de synthétiser les superviseurs de coordination de différents éléments. Nous allons partir de l'hypothèse qu'il est possible de synthétiser des superviseurs de niveau n, pour montrer de façon itérative qu'il est possible de synthétiser des superviseurs à tous les niveaux de la structure du système.

Les superviseurs de niveau n+1 assurent la coordination de plusieurs superviseurs de niveau n. Les modèles qui sont nécessaires à la synthèse sont, comme précédemment, un modèle du système à contrôler, et un modèle de spécification comportementale.

#### 4.2.1.4 Obtention des modèles de procédé de niveau n+1

Cette phase va nous permettre d'obtenir de façon automatique le modèle de procédé utilisé pour la synthèse d'un module de niveau n+1 (module de coordination) à partir des superviseurs de niveau n, par des étapes de projection, de changement de la contrôlabilité des événements et de composition.

Le modèle de système à contrôler que nous allons utiliser pour synthétiser le superviseur de niveau n+1 est composé de l'ensemble des modules de commande de niveau n, mais uniquement sur les parties de leurs alphabets correspondant à des événements de « haut niveau », c'est-à-dire n'appartenant pas au module de niveau n-1 (Figure 89).

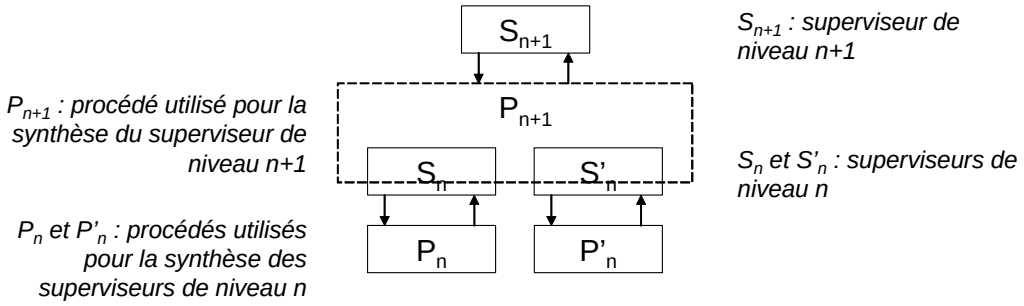



**Figure 89 : Procédé utilisé pour la synthèse d'un superviseur de niveau n+1**

Chaque module de niveau n, et ce à partir du niveau 2, possède des événements de différents niveaux, c'est-à-dire des événements qui appartiennent à l'alphabet du système à contrôler (ou des superviseurs de niveau n-1), et des événements qui appartiennent à l'alphabet du superviseur de niveau n+1 (Figure 90).

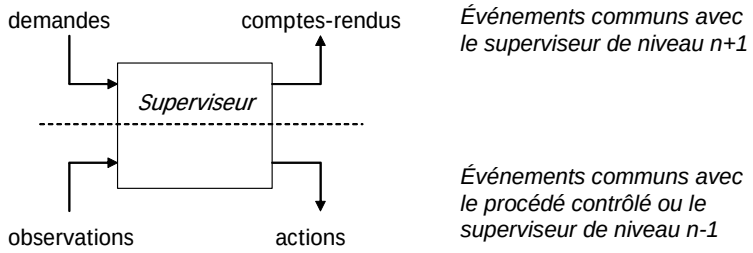



**Figure 90 : Evénements de différents niveaux appartenant à l'alphabet d'un superviseur**

## Etape n°1 : projection sur un alphabet de « haut niveau »

La coordination par un superviseur de niveau n+1 ne se fera que sur l'alphabet de ce niveau. La première étape de l'obtention de ce modèle de procédé de niveau n+1 est donc la projection des différents superviseurs à coordonner sur leur alphabet de « haut niveau ».

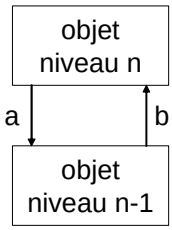
Nous rappelons que le principe de la projection est de ne conserver qu'une partie d'un alphabet de départ, en éliminant une partie des événements.

Au niveau du produit, les seuls événements observables seront ceux de niveau « opération produit », c'est-à-dire ceux correspondant à une requête ou un compte-rendu d'opération à réaliser sur le produit (Figure 86 et Figure 87).

## Etape n°2 : changement de la contrôlabilité des événements

Après avoir projeté ces superviseurs de niveau n sur un alphabet de niveau n+1, il faut changer la contrôlabilité des événements. En effet, les événements en entrée (resp. sortie) qui étaient vus par le niveau n comme incontrôlables (resp. contrôlables) sont vus par le niveau n+1 de façon complémentaire (Figure 91). Par exemple (Figure 90), les demandes en entrée

du niveau n, sont en sortie du niveau n+1, donc incontrôlables pour le niveau n mais contrôlable pour le niveau n+1.




| Événement | Objet niveau n | Objet niveau n-1 |
|---|---|---|
| a | contrôlable | incontrôlable |
| b | incontrôlable | contrôlable |

**Figure 91 : La contrôlabilité des événements varie en fonction du niveau des superviseurs dans la structure de commande**

**<u>Etape n°3 : composition de différents projetés à coordonner</u>**

Cette étape consiste en la composition synchrone, notée ||, des projections des différents superviseurs de niveau n (Figure 92).

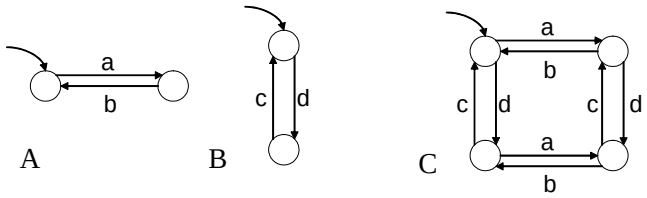



**Figure 92 : Exemple de composition synchrone d'automates : C = A || B**

Ainsi, les étapes 1 à 3 permettent d'obtenir le modèle du système à contrôler au niveau n+1, utilisé pour la synthèse du superviseur de niveau n+1.

### 4.2.1.5 Synthèse d'un superviseur de niveau n+1 (coordination de modules de niveau n)

Nous procédons, comme au paragraphe 4.2.1.2, à une synthèse classique, mais cette fois pour obtenir un superviseur de coordination. Ce superviseur sera obtenu à partir du modèle de système à contrôler établi au paragraphe 4.2.1.4 et à partir de spécifications de coordination des éléments de niveau n par le niveau n+1.

Nous utilisons, dans nos spécifications de commande, après une phase d'initialisation, une séquence définie par (Figure 93) :

- une ouverture : une requête d'opération par le produit sur une ressource (notée RP), ou une demande de départ d'un cycle d'exécution d'un sous ensemble d'une ressource ;
- un noyau : réalisation des opérations sur le produit ou exécution du cycle opératoire ;
- une fermeture : compte-rendu d'opération sur le produit (notée RQ) ou fin de cycle d'exécution sur le sous-ensemble de la ressource.

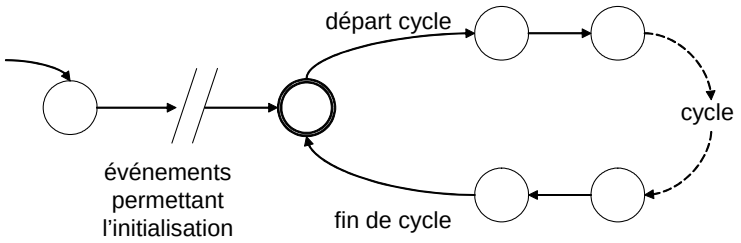



**Figure 93 : Forme générique d'une spécification de commande en coordination - actinomie**

L'ouverture et la clôture de la spécification de plus haut niveau (niveau « produit ») correspondent respectivement à la requête et au compte-rendu d'une opération réalisée sur le produit. Le cycle correspond à un raffinement de l'état dans lequel le produit subit une opération.

En utilisant notre proposition, nous pouvons synthétiser une architecture de superviseurs. La projection du superviseur du poste (plus haut niveau) sur l'alphabet des opérations doit donc correspondre au modèle de spécification du poste du point de vue du produit, et ne faire apparaître que des événements du niveau de contrôle par le produit. C'est en effet ce modèle qui servira dans la phase de synthèse de trajectoires du produit.

Sous cette forme, ces modules de commande ne sont pas encore implantables dans, par exemple, des automates programmables industriels. En effet, les modèles de superviseurs générés le sont sous la forme d'automates à états non déterministes. Il faut encore les interpréter pour en faire des contrôleurs implantables : c'est l'objet du paragraphe 4.2.2.

#### 4.2.1.6 A propos de la propriété de non-blocage des superviseurs modulaires

Lorsque l'on cherche à utiliser des techniques de synthèse modulaires (Wong & Wonham 1998) il faut vérifier que le système de commande vérifie la propriété de non-blocage. Le blocage peut être provoqué, par exemple, par plusieurs superviseurs agissant sur un même événement du système à contrôler. D'après la structuration de la commande que nous avons adoptée, les modules de commandes d'un même niveau ont des alphabets disjoints (le seul élément commun pouvant être commun est l'élément neutre $\varepsilon$). En ce sens, deux superviseurs ne contrôleront jamais un même événement (Figure 94), évitant ainsi une partie des blocages possibles, à l'image de ce que Leduc (2002) propose en intercalant une interface d'échanges entre un superviseur de coordination et les éléments coordonnés.

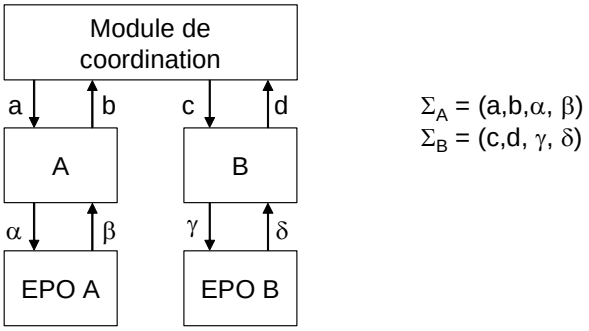



**Figure 94 : Exemple de modules coordonnées (A et B) dont les alphabets sont disjoints**

Cependant, notre approche ne garantit pas que les superviseurs synthétisés seront non-bloquants. En effet, il est possible que l'écriture de la spécification soit telle qu'une partie du système ne puisse plus évoluer à partir d'un ensemble d'états. Ainsi, en reprenant la structure de la Figure 94, l'exemple de la Figure 95 nous montre qu'il est possible qu'un module synchronisé par un superviseur de plus haut niveau ne puisse plus évoluer.

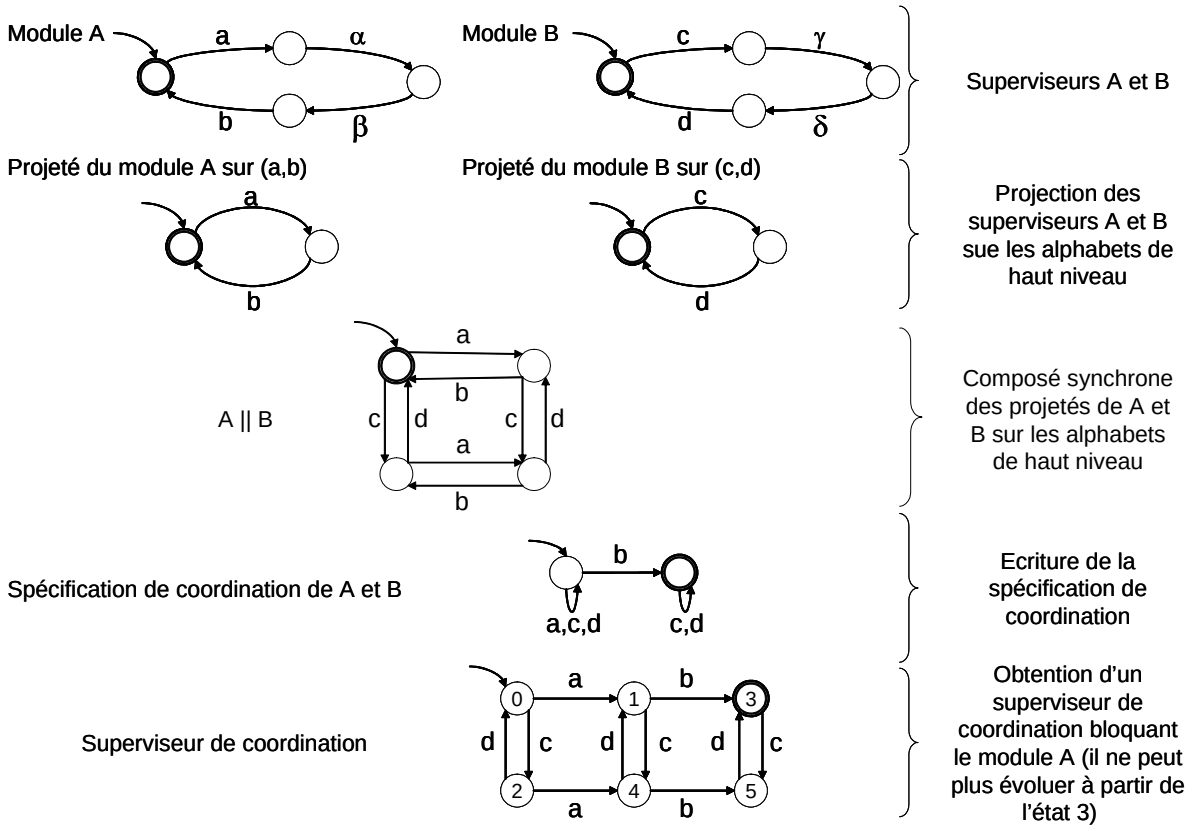



**Figure 95 : Exemple de synthèse d'un superviseur de coordination bloquant un des modules de niveau inférieur**

En perspective à cette approche, et afin de préserver les propriétés de non-blocage, il faudrait respecter les conditions nécessaires qui ont été démontrées par les travaux sur la commande par supervision décentralisée (Jiang & Kumar 2000), telles que la préfixe-clôture des langages, ou le non-blocage mutuel tel que présenté par Fabian et Kumar (2000), en proposant par exemple des règles d'écriture des spécifications.

### *4.2.2. Interprétation et implantation des superviseurs modulaires*

Nous avons présenté dans le paragraphe précédent une méthode permettant de synthétiser des superviseurs associés à des modules d'une architecture de commande. Ces superviseurs ne sont pas directement implantables car ils sont indéterministes et sont représentés dans le formalisme des automates à états. De plus, il est nécessaire d'interpréter ces superviseurs, qui autorisent et interdisent des événements, en des contrôleurs qui forcent des sorties d'un automate programmable. Il reste donc une phase d'interprétation et de traduction qui va les rendre déterministes, et les traduire dans un format compréhensible par les automates programmables, en d'autres termes, dans un des langages de programmation défini par la norme IEC 61131-3 (IEC 1993).

Différentes méthodes peuvent être utilisées pour satisfaire notre objectif qui est l'implémentation des modules de commande. Les approches dont nous nous sommes inspirés fournissent des mécanismes de traduction d'un superviseur en contrôleur (Marikar *et al.* 1998, Fabian & Hellgren 1998) sans modifier le cadre de la théorie du contrôle par supervision (Charbonnier *et al.* 1999, Figure 43) ni l'interprétation qui peut en être faite (Balemi *et al.* 1993).

Dans ces approches, deux étapes principales apparaissent :

- passage du superviseur le plus permissif à un contrôleur déterministe,
- codage du contrôleur dans un langage de programmation.

Notre proposition adapte la traduction et les règles de codage de Fabian & Hellgren (1998) afin de prendre en compte la structure modulaire de nos superviseurs.

#### 4.2.2.1 Règle de traduction 1 : priorités

Les règles de traduction doivent simplifier les superviseurs de manière à respecter la propriété suivante :

*Deux transitions t1 et t2 ne peuvent sortir d'un même état que si les deux événements associés aux transitions sont incontrôlables.*

Cette hypothèse forte est justifiée par le fait que :

- deux transitions contrôlables sortant d'un même état signifieraient que deux actions sont possibles dans un état donné, alors qu'un contrôleur réactif ne doit en forcer qu'une seule ;
- deux transitions, une contrôlable et une incontrôlable, peuvent générer une réaction non déterministe dépendant de la période d'échantillonnage durant laquelle les événements sont vus.

Pour éviter des situations de ce genre, un mécanisme d'allocation de priorités doit être mis en place. Dans le premier cas, la priorité sera donnée à l'événement qui appartient à l'alphabet de plus haut niveau ; si les deux événements sont de même niveau, les priorités doivent se référer à des choix de conception de l'application. Quel que soit le choix, le contrôleur restera dans tous les cas dans un espace d'états autorisés.

Dans le second cas, la priorité dépend de la contrôlabilité des événements, les événements incontrôlables étant prioritaires sur les événements contrôlables (sur la Figure 96, l'*observation* a une priorité plus haute que l'*action*), préservant ainsi la propriété de réactivité à l'occurrence spontanée d'événements.

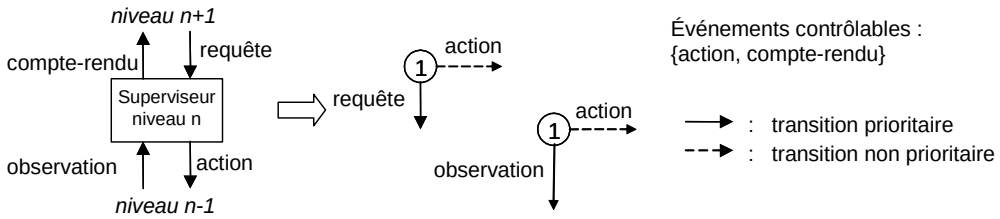



**Figure 96 : Exemple présentant les priorités utilisées**

#### 4.2.2.2 Règle de traduction 2 : codage par activation / désactivation synchrone

Les règles de traduction du contrôleur déterministe obtenu à l'aide de la règle précédente dans les langages cibles Ladder Diagram ou Structured Text (IEC 1993), sont basées sur des équations algébriques qui représentent l'activation (Ai) et la désactivation (Di) synchrone des états ($Si_t$) de la forme :

$$Si_{t+1} = Ai_t \vee (Si_t \wedge \neg Di_t)$$

Ce principe est illustré par l'exemple de la Figure 97.

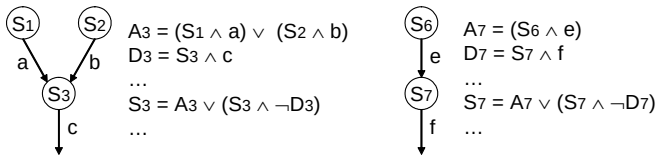



**Figure 97: Traduction algébrique par activation/désactivation**

L'implantation de ces équations algébriques sur une machine séquentielle nécessite un algorithme d'exécution qui évalue les variables d'*activation* avant les variables d'*état* afin d'assurer les propriétés de non-blocage et de réactivité du contrôleur implémenté. L'algorithme choisi est dit « sans recherche de stabilité » et consiste, pour chaque cycle de scrutation de l'Automate Programmable, en :

- lecture des entrées externes (événements incontrôlables),
- évaluation de la nouvelle situation (calcul des Ai et Di),
- désactivation et activation des états (mise à jour des Si),
- génération des événements internes (pour permettre le franchissement des transitions auxquelles un événement de sortie est associé) quand les états sources des transitions contrôlables sont actifs,
- écriture des sorties (contrôlables) quand les états cibles des transitions contrôlables sont actifs.

Enfin, la structure hiérarchique des superviseurs et contrôleurs synthétisés est codée en utilisant la notation des Function Blocks définis par la norme IEC 61131-3.

#### 4.2.2.3 Exemple d'application des règles de traduction

Afin d'illustrer ces règles de traduction, voici un exemple extrait du superviseur d'un EPO bistable, que nous synthétiserons dans l'exemple du paragraphe 4.3 (Figure 98) :

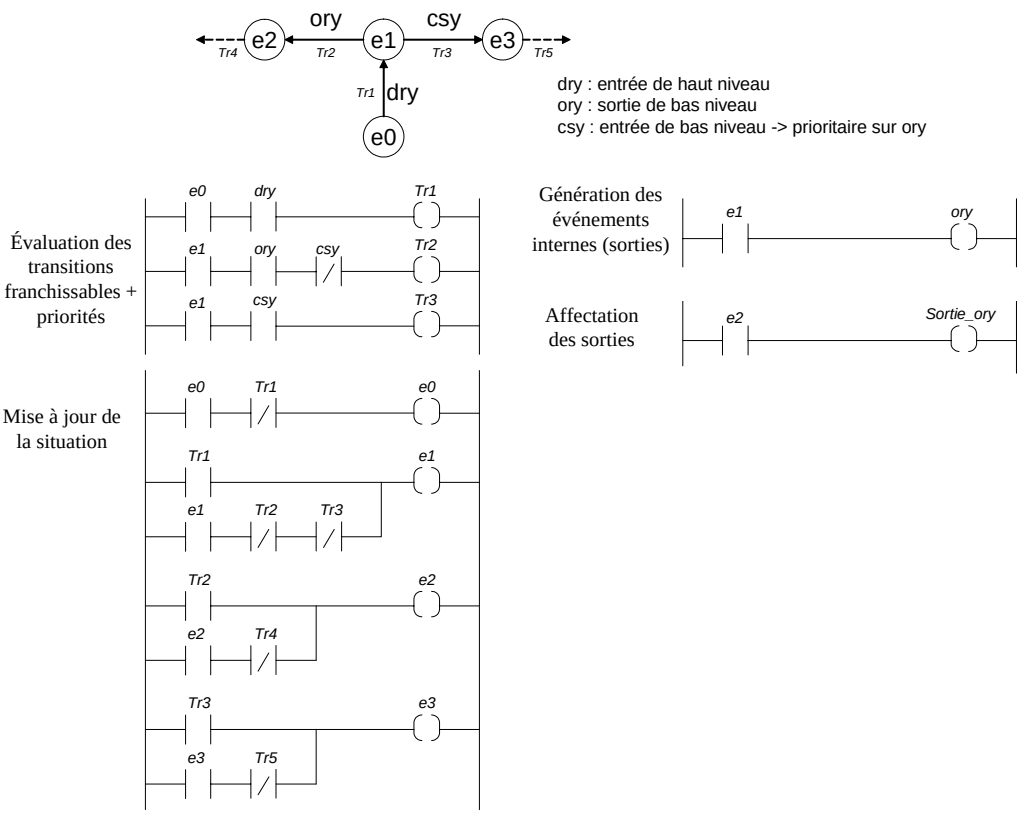



**Figure 98 : Exemple de traduction algébrique en Ladder Diagram**

### 4.2.2.4 Développement d'un outil logiciel

Afin de pouvoir tester nos propositions en terme de règles de priorités et de traduction, ces dernières ont été implantées dans un outil logiciel développé spécifiquement : TCT2SpeX. Ce dernier traite les fichiers *.ads générés par l'outil de synthèse de superviseurs TCT (développé à l'Université de Toronto et téléchargeable à l'adresse http://odin.control.toronto.edu/DES/), et les transforme, en fonction de nos propositions, en un bloc utilisable dans l'outil d'ingénierie automatique SPEX (Figure 99). Ainsi, il est possible dans SPEX de simuler le comportement des contrôleurs générés à l'aide des techniques de synthèse, mais également de générer des éléments de code automate téléchargeable dans les automates programmables industriels.

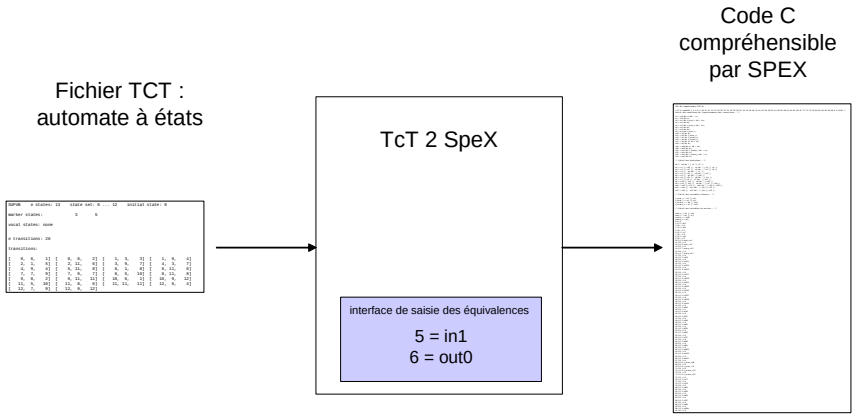



**Figure 99 : Principe de fonctionnement de TCT2SpeX**

### *4.2.3. Vue globale de la démarche proposée*

Nous avons montré par récurrence qu'il était possible de synthétiser des superviseurs à chaque niveau de la structure de commande du système automatisé, et proposé une interprétation des superviseurs en contrôleurs implantables.

Nous pouvons résumer notre démarche itérative de la manière suivante (Figure 100) :

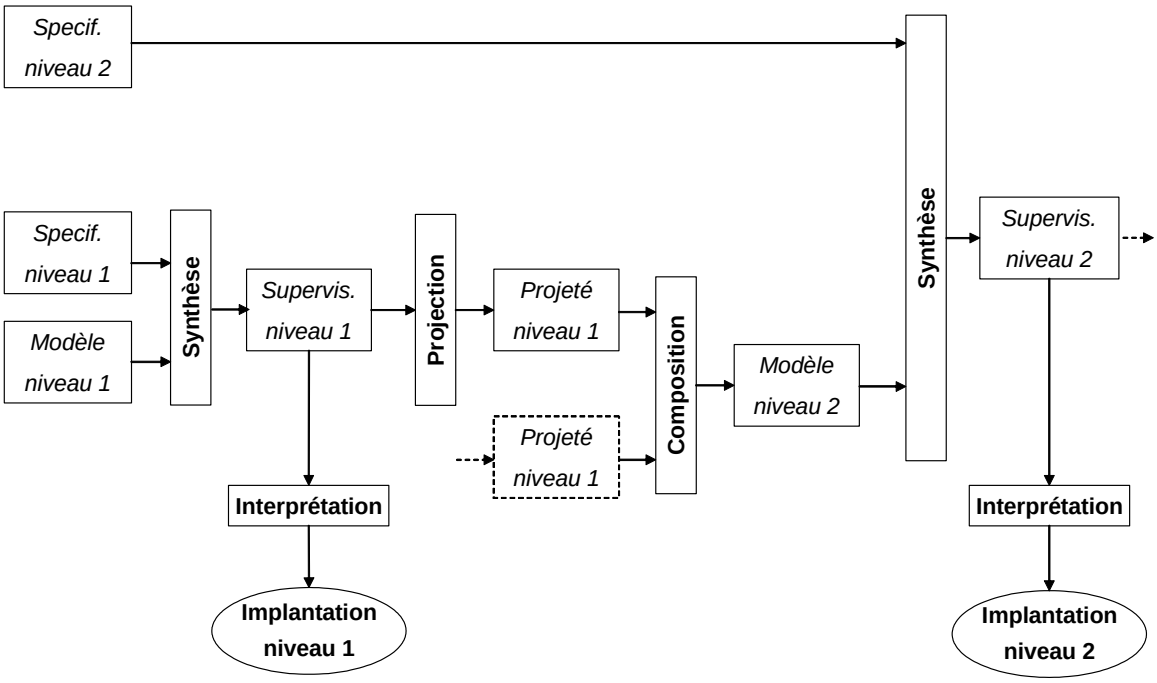



**Figure 100 : Principe de la synthèse modulaire (Gouyon *et al*. 2002)**

Nous allons maintenant appliquer notre démarche sur un exemple extrait d'un poste d'assemblage du Système Flexible de Production (SFP) de l'AIPL.

## *4.3. Application sur le manipulateur d'un poste d'assemblage du Système Flexible de Production de l'AIP*

Le système sur lequel nous allons nous baser pour illustrer notre méthode d'automatisation est un manipulateur pneumatique. Il est capable de prendre et de poser des pièces sur huit emplacements : 4 sur une palette, dans 3 magasins et sur un module d'alignement/orientation (Figure 101).

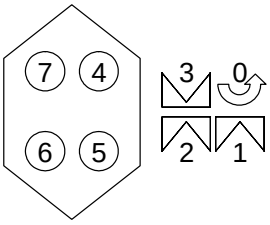



**Figure 101 : Huit emplacements possibles**

Physiquement, le manipulateur est constitué (Figure 102) :

- de deux vérins linéaires double effet sur l'axe X, un grand et un petit ;
- d'un vérin rotatif double effet d'axe Y ;
- d'un vérin linéaire simple effet d'axe Z ;
- d'une ventouse avec un système de venturi assurant la préhension des pièces.

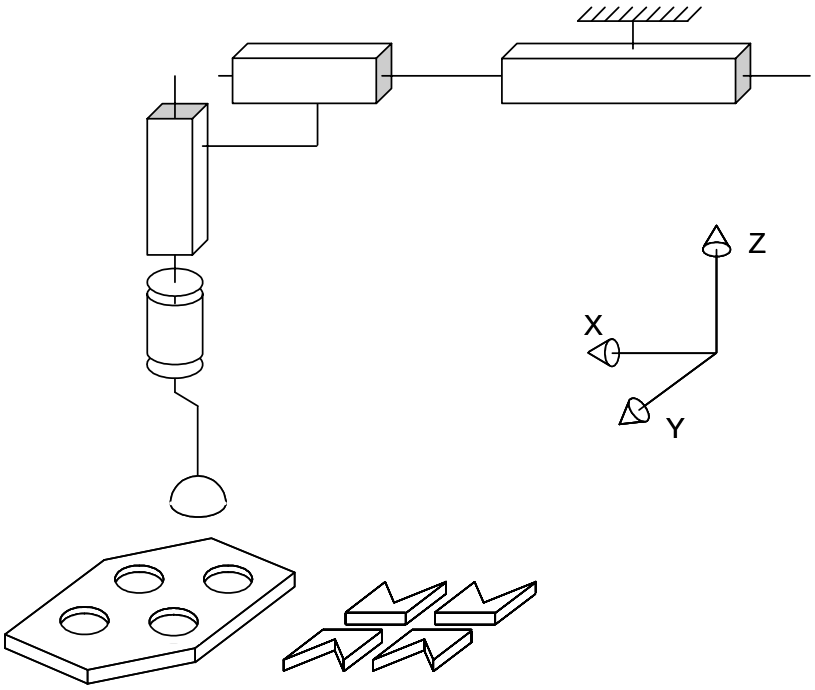



**Figure 102 : Schéma cinématique du manipulateur d'un poste d'assemblage du SFP**

Tous les vérins et le venturi sont couplés à des distributeurs 5/2 bistables, sauf le vérin Z dont le distributeur est monostable. Tous les vérins possèdent 2 capteurs inductifs de fin de course, et la ventouse un capteur de dépression indiquant la prise d'une pièce.

Ce manipulateur déplace des pièces (Figure 103) depuis les magasins et l'orienteur jusqu'aux emplacements de la palette afin de constituer des produits (Figure 104).

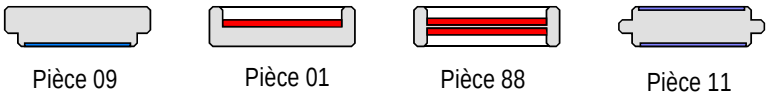



**Figure 103 : Pièces disponibles dans les magasins des postes du SFP**

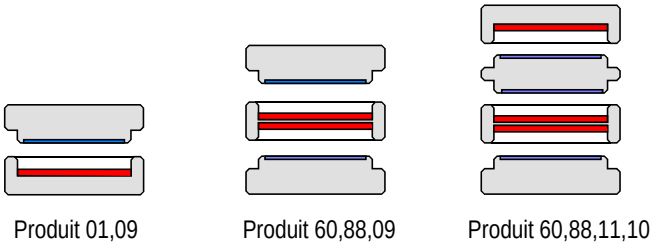



**Figure 104 : Exemples de produits assemblés sur le SFP**

Fonctionnellement, le manipulateur est structuré en différentes parties :

- la fonction « prendre / poser », qui correspond à la synchronisation du mouvement vertical et de la préhension des pièces ;
- la fonction « déplacer », qui correspond à la synchronisation des mouvements dans le plan défini par les axes X et Y ;
- la fonction « manipuler », qui correspond à la synchronisation des fonctions « prendre / poser » et « déplacer ».

La commande du manipulateur sera donc structurée sous la forme de blocs coordonnés / coopérants (Figure 105), cette structure de commande étant basée sur la structure physique du système à contrôler.

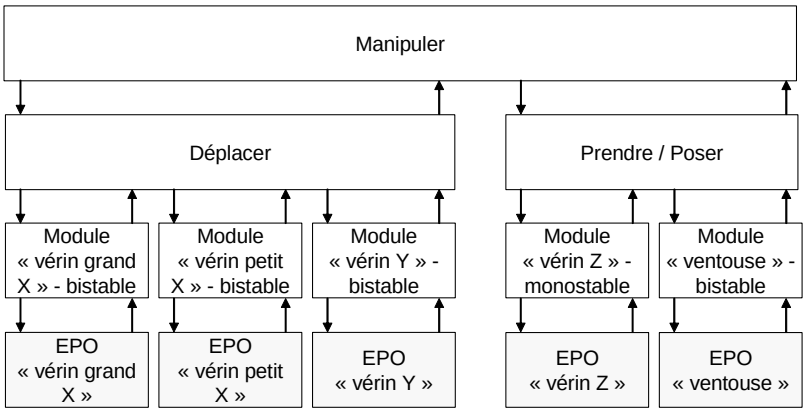



**Figure 105 : Structure du système de commande du manipulateur**

| Abréviation | Nom de l'événement |
|---|---|
| cr | capteur de fin de course – vérin rentré |
| cs | capteur de fin de course – vérin sorti |
| or | ordre de rentrée du vérin |
| os | ordre de sortie du vérin |
| er | état rentré du vérin |
| es | état sorti du vérin |
| dr | demande de rentrée du vérin |
| ds | demande de sortie du vérin |
| ea | état pièce aspirée |
| el | état pas de pièce aspirée (pièce libérée) |
| da | demande d'aspiration |
| dl | demande d'arrêt d'aspiration |
| dd | demande de descente |
| dh | demande de montée |
| ed | état descendu |
| eh | état haut |
| epo | état pièce posée |
| epr | état pièce prise |
| dpo | demande de pose |
| dpr | demande de prise |
| ei | produit à la position i |
| di | demande pour déplacer le produit à la position i |
| rq xx | requête d'assemblage d'un composant de type xx |
| rp xx | compte-rendu d'assemblage d'un composant de type xx |

**Tableau 1 : Evénements utilisés dans les modèles de l'exemple**

Pour illustrer notre approche itérative, nous allons synthétiser les différents composants de la commande présents dans la structure de contrôle du manipulateur. Les différents événements utilisés dans les modèles qui seront présentés dans cet exemple sont récapitulés dans le Tableau 1. L'ensemble des modèles à états utilisés figure en annexes de ce manuscrit.

### *4.3.1. Synthèse d'un module de commande du niveau 1*

Au niveau le plus bas, les superviseurs sont chargés de contrôler seulement un EPO. Prenons l'exemple d'un module de commande qui sera chargé de contrôler un EPO composé d'un vérin double effet, de son distributeur bistable et de ses deux capteurs de fin de course (Figure 106).

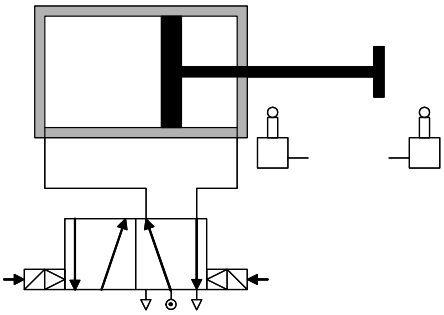


**Figure 106 : Elément de Partie Opérative**

Pour effectuer cette synthèse, il faut :

- un modèle du système physique à contrôler (noté *modèle niveau 1* sur la Figure 100),
- un modèle de spécification du comportement du système contrôlé (noté *spécif niveau 1* sur la Figure 100).

Il est assez simple de représenter l'EPO de cet exemple, car il s'agit d'un élément standard, dont le comportement est relativement élémentaire (Figure 107). Cet ensemble a deux états stables (*rentré* et *sorti*) dont un initial et deux états transitoires (*rentrant* et *sortant*). Nous admettons comme condition initiale que le vérin est rentré

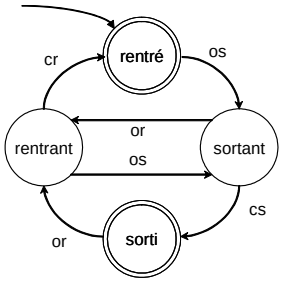



**Figure 107 : Modèle du comportement d'un EPO de type bistable**

On peut voir sur la Figure 107 que ce modèle a un alphabet uniquement composé d'événements relatifs à la technologie de l'EPO. Le module de commande de plus bas niveau que nous allons synthétiser dans ce premier temps a pour rôle de séparer les aspects fonctionnels de ceux relatifs à la technologie. Il doit de plus intégrer un filtrage des demandes et des observations afin de ne tenir compte que de celles qui sont cohérentes avec le

comportement attendu de l'EPO. De nouveaux événements de type « fonctionnel », qui viennent s'ajouter à l'alphabet du procédé, sont utilisés dans ce module de commande.

Pour qu'une synthèse soit possible, il est nécessaire que les alphabets des modèles utilisés soient semblables. Afin de compléter celui de l'EPO à contrôler, il faut ajouter, en boucles (ou « selfloop ») sur chaque état, les événements de l'alphabet du module de commande qui n'appartiennent pas à l'alphabet du procédé (Figure 108).

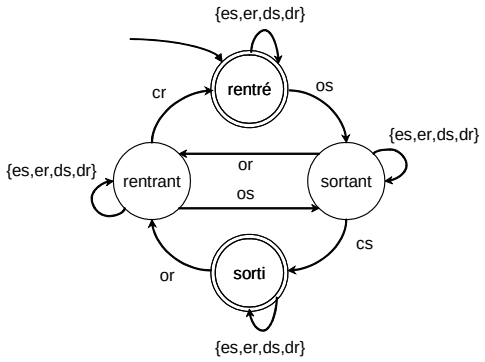



**Figure 108 : Modèle utilisé pour la synthèse du module de commande de plus bas niveau**

Pour décrire les spécifications de commande, il est possible de procéder de manière parcellaire (Figure 109), et d'opérer ensuite une composition synchrone pour obtenir le modèle de spécification complet. Dans notre cas, nous avons écrit les liens entre les événements d'entrée des filtres, et les événements de sortie. Deux automates décrivent les règles qui filtrent ou valident les demandes de sortie ou de rentrée du vérin, en fonction de son état courant ; par exemple (en haut à gauche de la Figure 109), une demande de sortie ne pourra être prise en compte que suite à l'apparition d'un ordre de rentré du vérin. Deux automates décrivent règles qui filtrent ou valident les observations ; par exemple (en haut à droite de la Figure 109), un compte-rendu d'état sorti (*es*) ne peut être émis que suite à l'apparition de l'événement *cs* après un mouvement de sortie du vérin (*os*).

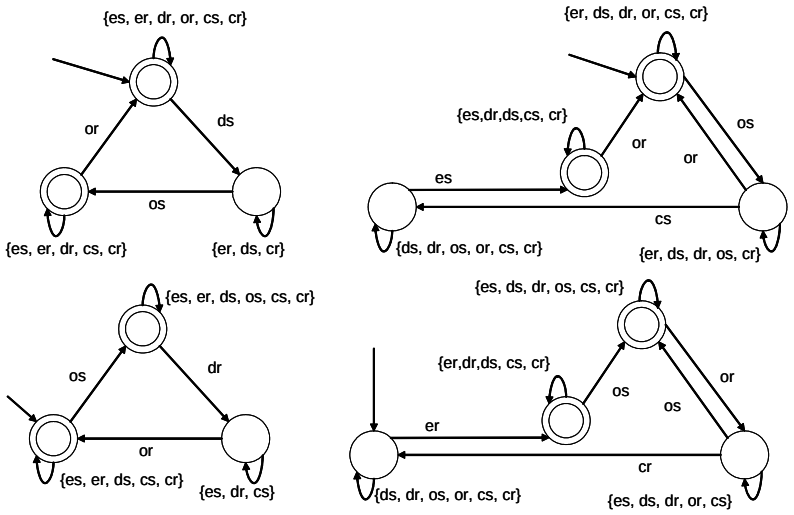



**Figure 109 : Description des spécifications de commande de manière parcellaire avant composition**

Une fois que les modèles du système et de ses spécifications sont décrits complètement, il faut procéder à la synthèse du superviseur associé à l'élément de commande (Figure 110) (12 états, 28 transitions).

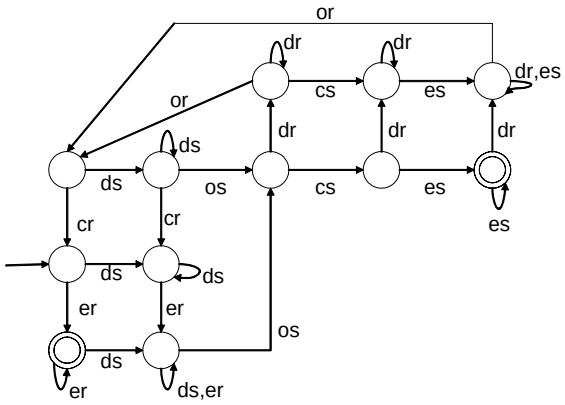



**Figure 110 : Superviseur du module de commande de plus bas niveau associé à un EPO bistable**

Le module que nous venons de synthétiser pouvant correspondre à plusieurs EPO, nous allons l'instancier plusieurs fois : pour les EPO des vérins « petit x », « grand x », « y » (Figure 111) et pour l'EPO de la « ventouse » qui a le même comportement que les EPO composés d'un vérin, d'un distributeur bistable et de capteurs de fin de course.

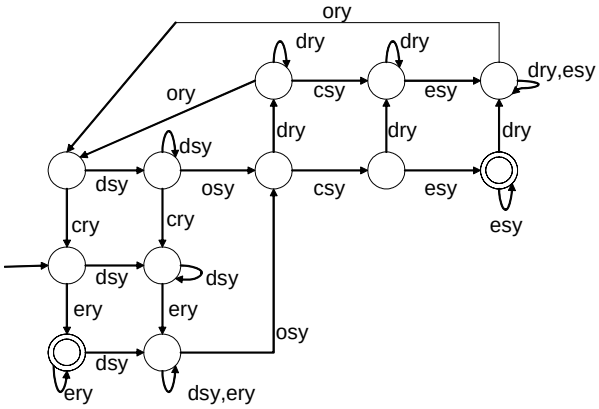



**Figure 111 : Exemple d'instance de superviseur du module de contrôle de l'EPO "vérin Y"**

Dans le cadre de notre exemple du manipulateur, il faut également synthétiser, au plus bas niveau, le superviseur associé au module de commande de l'EPO « vérin Z » dont le fonctionnement est de type monostable. Le principe de la synthèse est le même ; seuls changent les modèles du système à contrôler et des spécifications, en fonction de la technologie :

- maintien de l'ordre de sortie,
- pas d'ordre de rentrée, nous utiliserons ici plutôt la notion de front descendant de l'ordre de sortie.

Une fois les superviseurs de plus bas niveau synthétisés, il faut passer à la synthèse des modules de coordination. Ces modules de coordination sont synthétisés à partir de modèles de spécifications de coordination, et à partir de modèles de systèmes à contrôler obtenus par projection et composition des superviseurs de niveau inférieur, comme décrit au paragraphe 4.2.1.4.

### *4.3.2. Obtention du modèle de procédé de niveau 2*

Le niveau 2 correspond à un niveau de coordination où l'on retrouve les fonctions « prendre / poser » et « déplacer ». Nous allons nous intéresser à la première qui correspond à la coordination du mouvement sur l'axe Z et de la préhension des pièces.

Selon la méthode décrite dans le paragraphe 4.2.1.4, nous projetons les superviseurs de niveau 1 sur leur alphabet de « haut niveau ». Nous obtenons les différents projetés de la Figure 112.

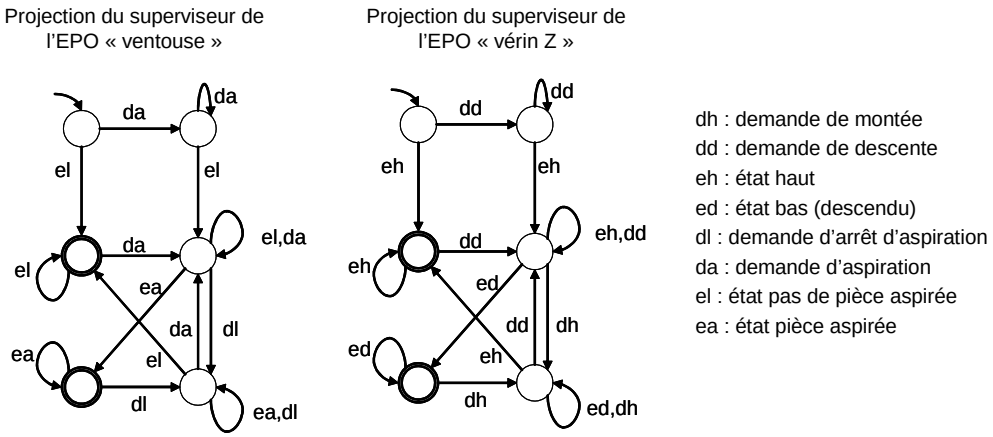



**Figure 112 : Projection des superviseurs des EPO "vérin Z" et "ventouse" sur l'alphabet des demandes et des états**

Le modèle de système à contrôler utilisé pour la synthèse du superviseur de coordination de niveau 2 est une composition synchrone des deux projetés de la Figure 112.

Le modèle de spécifications du superviseur de la fonction « prendre / poser » (Figure 113) est composé de deux parties : une initialisation et une séquence représentant le cycle de « travail », déclenché par une *demande de prise* (dpr) ou une *demande de pose* (dpo) (« préparer »), et terminé par des événements de fin de cycle (*état pièce prise* ou *état pièce posée)* (« clôturer »).

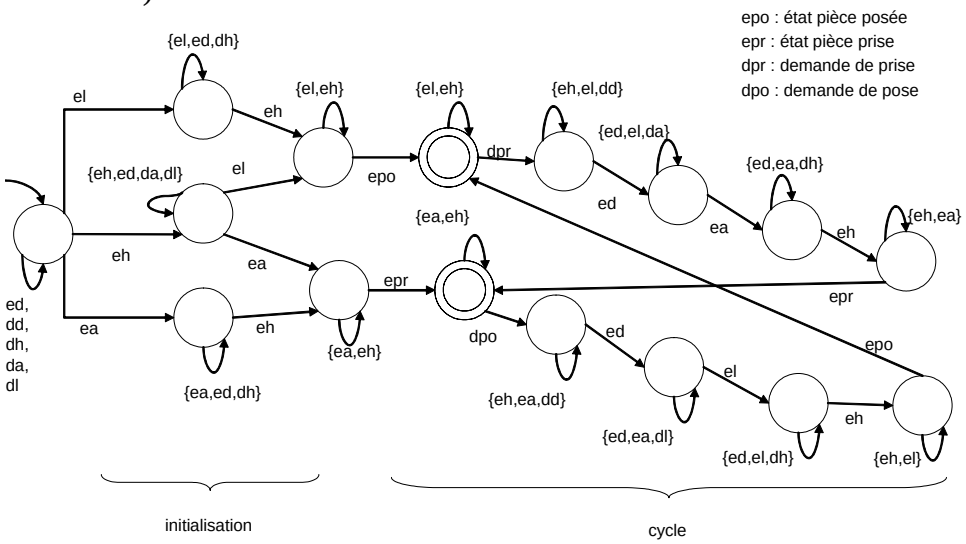



**Figure 113 : Modèle de spécification de la fonction "prendre / poser"**

La synthèse du superviseur de la fonction « prendre / poser » donne un automate à 20 états et 63 transitions (Figure 114).

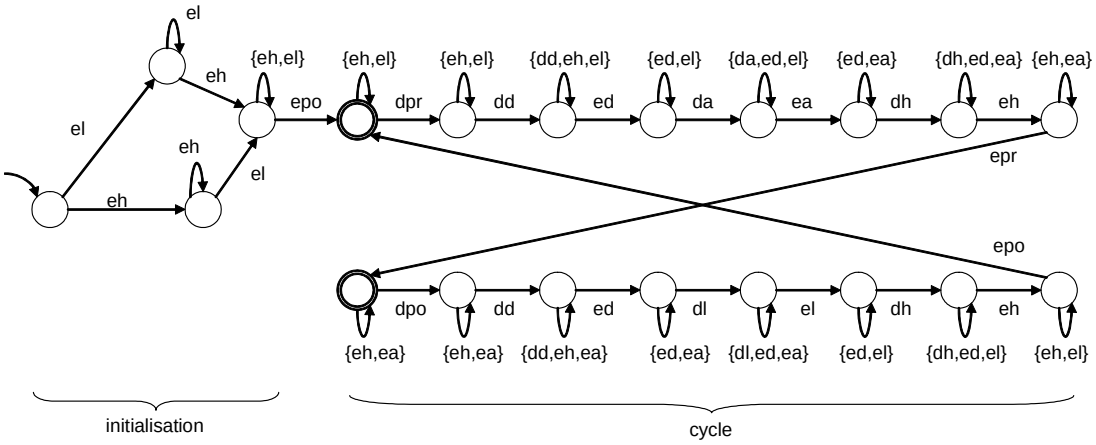



**Figure 114 : Superviseur de la fonction "prendre / poser"**

Cette démarche est itérative. Il faut faire de même pour tous les modules de la commande. Ainsi, dans notre exemple du manipulateur, il faut synthétiser la fonction « déplacer » et la fonction « manipuler », réalisée au niveau du poste.

Cette dernière est celle de plus haut niveau de l'exemple du manipulateur. C'est donc à ce niveau que vont intervenir les événements appartenant à l'alphabet des opérations faites sur le produit (Figure 115). Le poste reçoit des requêtes pour un assemblage de pièces (notées *Rq*), et émet des comptes-rendus (notés *Rp*).

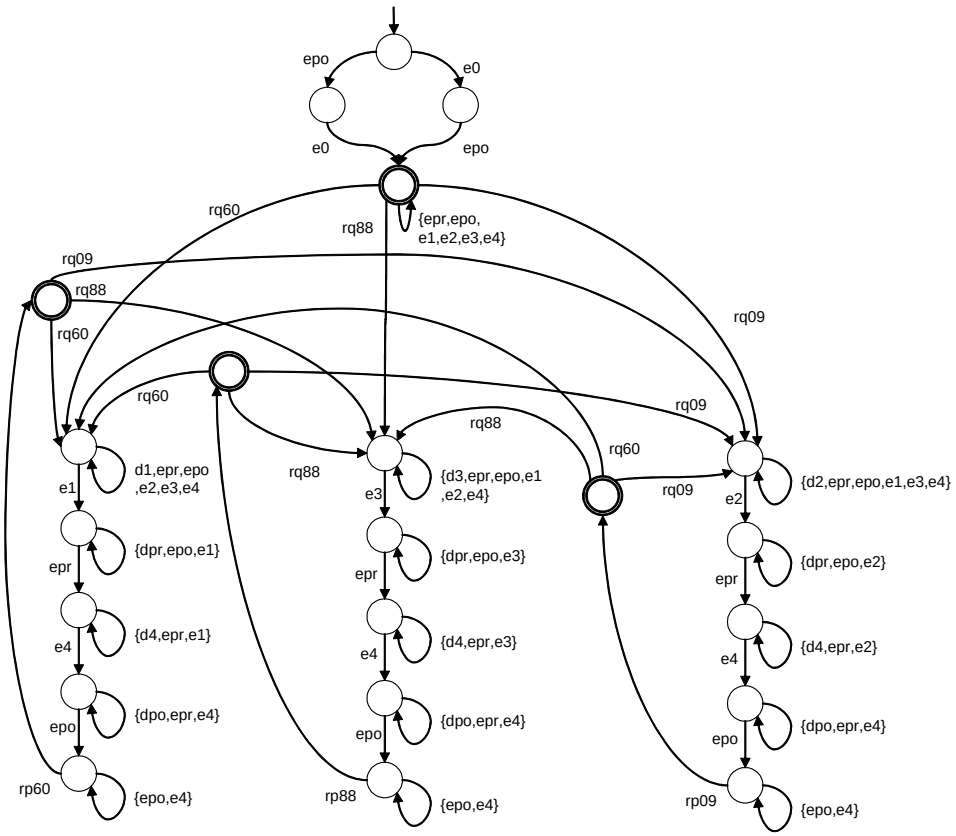



**Figure 115 : Exemple de modèle de spécifications du manipulateur**

Cette spécification nous permet de procéder à la synthèse du superviseur de plus haut niveau (34 états, 43 transitions). Nous pouvons vérifier que la projection sur l'alphabet des opérations de ce superviseur (Figure 116) correspond bien au modèle des opérations qui ont été extraites de la phase de modélisation (chapitre 3).

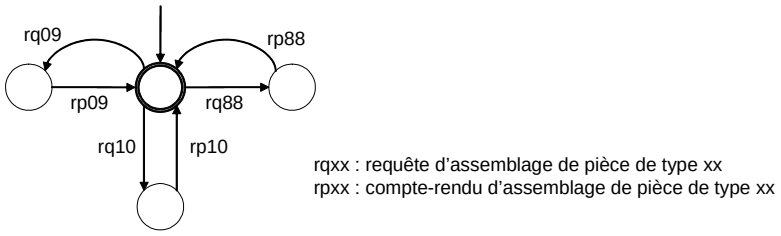



**Figure 116 : Exemple de projection du superviseur d'un manipulateur capable d'assembler des pièces de type 09, 10 et 88**

### *4.3.3. Interprétation / implantation*

Tous les éléments que nous avons pu synthétiser sont implantables sur une architecture de commande. Nous avons testé ces éléments sur un poste du Système Flexible de Production de l'AIPL (Figure 117).

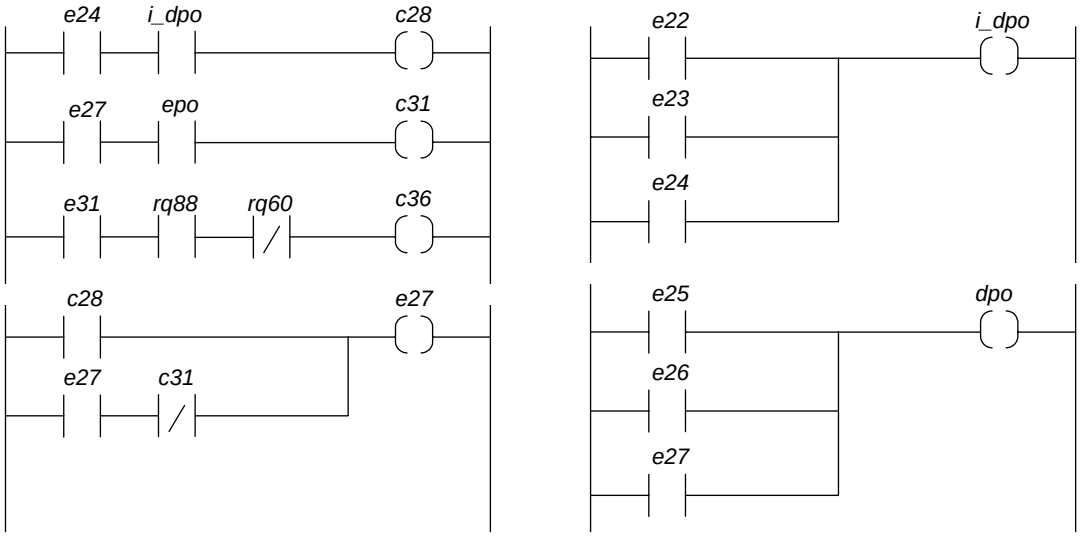



**Figure 117 : Extrait de code automate implanté (fonction « manipuler »)**

## *4.4. Discussion sur la méthode*

Nous avons montré dans le paragraphe précédent qu'une démarche de synthèse modulaire basée sur la structuration des processus physiques était réalisable. Cependant, dans le cadre de la théorie du contrôle par supervision, la définition des modèles de procédé et de spécification reste une tâche très délicate, en particulier lorsque les systèmes à modéliser ont une taille conséquente (Hiraishi 2001). En effet, la modélisation de systèmes de complexité industrielle requiert une analyse préalable, basée sur l'utilisation de formalismes de représentation abstraits, plus ou moins formels, sous une forme fonctionnelle, ensembliste, …, permettant

d'appréhender, de manière pragmatique, intuitive, voire qualitative, le fonctionnement global d'un système à concevoir (Marikar *et al.*, 1998).

Notre démarche répond en partie à cette problématique puisque :

- la modélisation du système à contrôler est systématique : les modèles d'équipements technologiques sont des instances réutilisables de comportements génériques stockés en bibliothèque, et les modèles des éléments des niveaux supérieurs sont obtenus automatiquement par projection et composition ;
- l'écriture des spécifications est facilitée puisque les propriétés que doit respecter le procédé sont modélisées de manière parcellaire relativement à la mission associée à un superviseur donné, et cela suivant des cycles de fonctionnement (préparer – échanger – clôturer). En particulier, la spécification relative à la synthèse d'un contrôleur de niveau n ne tiendra pas compte des contraintes de niveau n-2 qui sont prises en charge par le superviseur de niveau n-1.

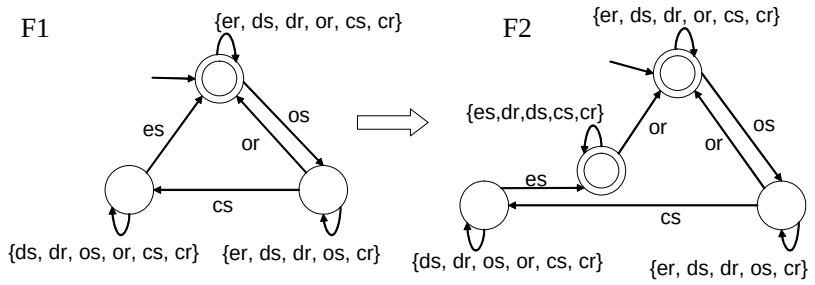
Il nous faut néanmoins admettre que le travail d'élaboration des modèles de spécifications, même s'il est facilité par la décomposition des propriétés à respecter, reste un problème difficilement décidable (Gouyon *et al.* 2003-2). En ce sens, nous allons essayer dans ce paragraphe de mettre en évidence le manque de « stabilité » de la synthèse vis-à-vis des modèles de spécifications.

Dans le cadre de notre étude, il est apparu que plusieurs modélisations, dont les différences pouvaient être plus ou moins importantes (marquage, structure et permissivité), étaient envisageables pour représenter les spécifications des filtres et des modules de coordination.

Nous avons donc cherché à appliquer notre démarche avec différents modèles de spécifications admissibles pour le problème considéré, afin d'essayer de mesurer l'influence des variations apportées à une spécification sur les résultats obtenus par la synthèse.

En ce qui concerne la modification du marquage des états, deux séries de tests ont été réalisées : tous les états marqués et une proposition intermédiaire dans laquelle seulement une partie des états est marquée.

En ce qui concerne la structure des spécifications, deux types de spécifications (notés F1 et F2 dans le Tableau 2 et le Tableau 3) ont été proposées pour les filtres de commande associés aux vérins : présence, ou pas, d'un état permettant de maintenir les comptes-rendus d'états « rentré » ou « sorti » du vérin (Figure 118).




*Spécifications du superviseur d'un EPO bistable : ajout d'un état (maintien du compte-rendu « état sorti »)*

**Figure 118 : Test relatifs à la structure des modèles de spécifications**

Nous avons également procédé à plusieurs essais concernant la permissivité, avec des spécifications tolérants plus ou moins d'événements en boucle sur les états. Pour cela, nous avons proposé de nouvelles spécifications de coordination.

Nous en proposons une (qui sera appelée plus bas *C4*) avec une phase d'initialisation suivie d'un cycle déclenché par un « départ cycle » (*dcy*) et finissant par un compte-rendu de fin ce cycle (*fcy*) (Figure 119) :

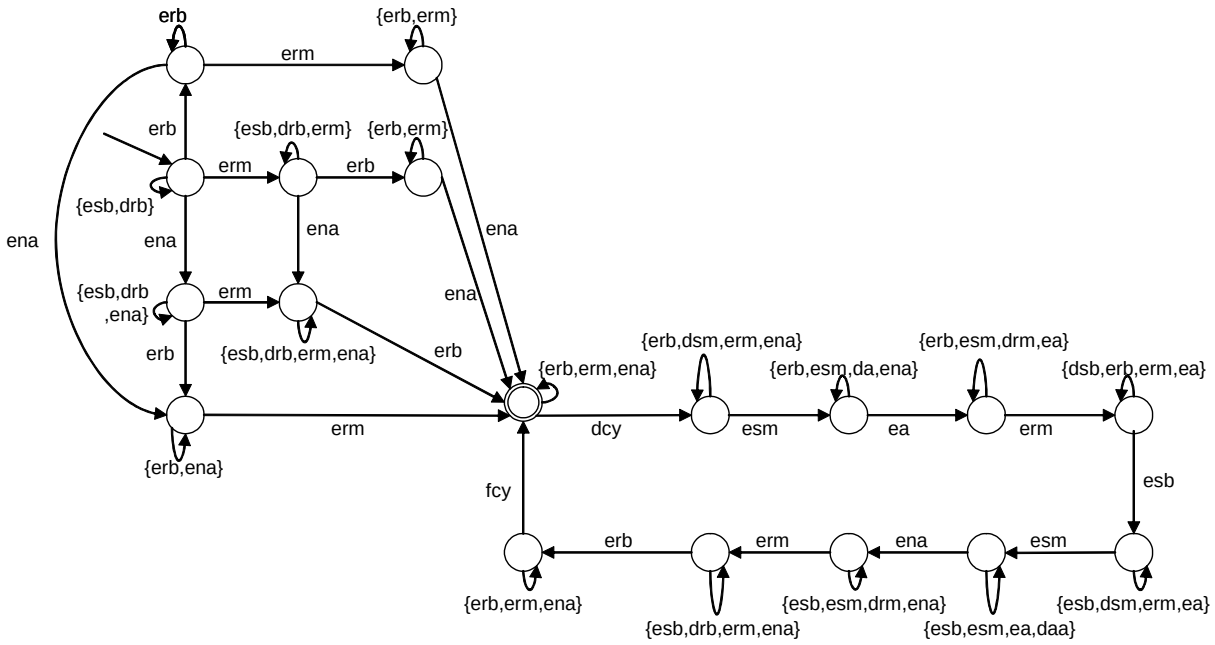



**Figure 119 : Modèle de spécification de coordination du manipulateur**

Comme précédemment, nous procédons à une synthèse du superviseur de coordination, qui aura dans le cas de cette spécification (notée plus loin *C4*) 38 états et 106 transitions. Des variantes de cette spécification de coordination, notées C1, C2, C3 dans le) ont été proposées : avec ou sans initialisation, et avec deux niveaux de permissivité en restreignant/augmentant les évènements autorisés en boucles sur les états (les spécifications C1 et C2 apparaissent sur la Figure 118).

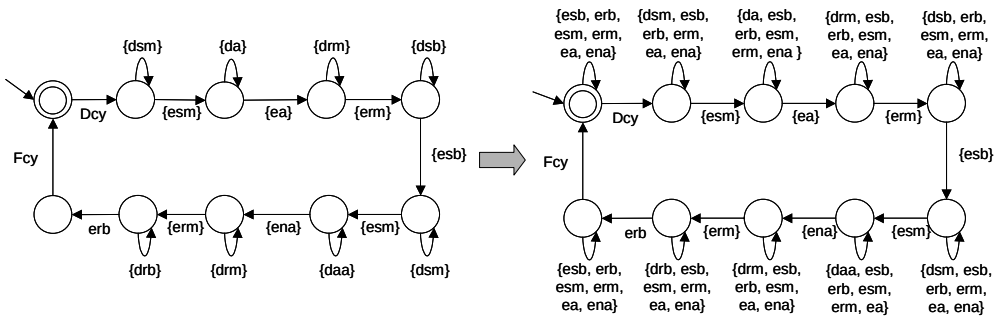



**Figure 120 : Test relatifs au degré de permissivité des modèles des spécifications de coordination**

### *4.4.1. Influence des marquages*

Les états marqués sont définis dans (Ramadge & Wonham 1987) comme appartenant au langage marqué $L_m$ : *« $L_m(G) \subset L(G)$ is a distinguished subset of these sequences that may be « marked », or recorded, perhaps representing completed « tasks » (or sequences of tasks) carried out by the physical process that G is intended to model* ». Cette définition peut être interprétée différemment par chaque utilisateur, en fonction de ses attentes en terme de comportement souhaité du procédé.

En effet, pour le modèle de comportement d'un Elément de Partie Opérative (EPO) composé d'un vérin double effet, de son distributeur et de ses capteurs de fin de course, il est assez naturel de marquer les états correspondant à des états stables c'est-à-dire ceux correspondant à un état « rentré » ou « sorti » du vérin (Figure 107). Ils correspondent effectivement, comme dans la définition de (Ramadge & Wonham 1987), à l'achèvement d'une tâche du vérin, à la fin d'un mouvement.

En revanche, le choix du marquage des états des automates correspondant aux spécifications n'obéit à aucune heuristique précise : à titre d'exemple, dans la description du cycle de « prise pose » de notre étude, faut-il considérer que les seuls états marqués sont les états à partir desquels l'appui sur un « départ cycle » provoque une séquence non interruptible, ou faut-il considérer que chaque état stable du préhenseur (en position de butée sur l'axe horizontal et/ou vertical) est potentiellement un état marqué ?

Au regard des différents tests que nous avons pu réaliser, la réponse à cette question s'avère d'autant plus importante que toute modification du marquage des modèles de spécifications et/ou des modèles du système à contrôler, fut-elle minime, conduit invariablement à des résultats de synthèse très différents.

Le Tableau 2 présente différents cas de marquages des états, un dans lequel tous les états sont marqués et un autre qui est une proposition qualifiée dans le tableau de « normale », dans laquelle les états marqués représentent les états physiques stables. Dans la mesure où les algorithmes de synthèse (et notamment les algorithmes de Ramadge et Wonham implémentés dans le logiciel TCT que nous avons utilisé) sont basés sur la notion d'états marqués, les résultats obtenus pour la synthèse des filtres de comportement (2 premières lignes du Tableau 2) présentent un spectre plutôt large au niveau du nombre d'états. Il paraît donc très important de déterminer un marquage « correct », ce qui s'avère difficile dans la mesure où il faut pouvoir connaître les états représentant l' « achèvement des tâches » (*…representing completed « tasks » (or sequences of tasks)…*, (Ramadge & Wonham 1987)).

| | Spécification F1 | | Spécification F2 | |
|---|---|---|---|---|
| | *Normal* | *Tout marqué* | *Normal* | *Tout marqué* |
| Filtre bistable | [12,24,2] | [32,78,12] | [12,28,2] | [40,100,16] |
| Filtre monostable | [12,30,1] | [12,30,8] | [12,34,1] | [12,34,8] |
| Projection bistable | [8,20,2] | [9,24,9] | [6,16,1] | [7,20,7] |
| Projection monostable | [8,20,2] | [8,20,8] | [6,16,1] | [6,16,6] |

**Tableau 2 : Influence du marquage des spécifications sur le résultat de synthèse ;** *Notation : [12,34,8] = automate à 12 états, 34 transitions et 8 états marqués*

La solution qui consiste à marquer tous les états des spécifications présente l'avantage de systématiser la démarche mais conduit, dans la plupart des cas, à un phénomène d'explosion combinatoire, c'est-à-dire à des superviseurs très volumineux pour lesquels bon nombre d'états n'ont aucune signification vis-à-vis de la commande.

Il est à noter que cette différence importante de taille entre les superviseurs associés aux filtres de comportement des vérins, due aux différents marquages des spécifications, s'estompe lorsque l'on applique une projection visant à ne conserver que les événements utilisables par le niveau supérieur (cf. les projections dans le Tableau 2), à savoir le module de coordination.

### *4.4.2. Influence de la structure des automates*

Pour la commande associée aux éléments technologiques (les EPO dans notre étude), nous cherchons à synthétiser des modules qui filtrent les commandes fonctionnelles émises à destination des équipements technologiques, en vérifiant leur compatibilité vis-à-vis de l'état courant, et les observations, en les consolidant par une prédiction de l'état de l'équipement qui est fonction des ordres auxquels il a été soumis.

A partir d'un texte en langage naturel explicitant ces contraintes (Figure 121), la formalisation sous forme algébrique est atteignable (Roussel & Faure, 2003) alors qu'elle est beaucoup plus délicate sous la forme d'un automate à états finis.

**A1**. Une demande de sortie adressée au filtre se traduit par un ordre de sortie émis vers l'électrovanne du distributeur si et seulement si le vérin n'est pas déjà dans un état sortie et aucune demande de rentrée n'est active.
**A2**. Un compte-rendu d'état sortie est émis si et seulement si le passage à vrai du capteur fin de course « sorti » suit un ordre de sortie émis préalablement.
**…**

**Figure 121 : Exemples d'assertions spécifiant un module de commande d'un EPO**

En effet, le problème posé consiste alors à extraire de la spécification en langage naturel :

- la structure de l'automate : quel sont les états significatifs ?
- le degré de permissivité de la spécification : quels sont les événements autorisés en boucles sur les états ?
- les marquages associés aux états (cf. paragraphe précédent).

Compte tenu de la diversité des réponses que l'on peut apporter à ces questions, tout en restant cohérent vis-à-vis des spécifications exprimées initialement en langage naturel, on peut s'attendre à ce que des spécifications assez différentes (telles que celles de la Figure 109, de la Figure 118 et de la Figure 120) puissent être utilisées comme point d'entrée du processus de synthèse.

Si l'on considère les spécifications F1 et F2 associées au filtre de comportement (cf. Tableau 2), l'influence des spécifications sur les superviseurs associés aux vérins semble faible dans le cas d'un marquage intermédiaire : le nombre d'états des superviseurs est identique (12), seul diffère le nombre de transitions (24 pour F1bistable au lieu de 28 pour F2bistable). D'autre part, ces différences sont parfaitement explicables dans la mesure où les quatre transitions supplémentaires correspondent à l'événement « état sorti noté *es* » en boucle sur quatre états.

En ce qui concerne la permissivité de chaque état, il est important de tenir compte qu'une spécification peut être écrite en plusieurs parties, et que ces parties seront assemblées par composition synchrone. En effet, il faut être suffisamment permissif dans chaque spécification pour que les autres spécifications puissent s'exécuter parallèlement. En ce sens, il faut tolérer en boucle sur les états tous les événements qui ne sont pas contradictoires avec la situation d'un état. Par exemple, on ne peut tolérer en boucle sur un état d'avoir à la fois un événement indiquant qu'un vérin est sorti et un autre indiquant qu'il est rentré, alors qu'on peut tolérer plusieurs requêtes contradictoires.

Pour illustrer cette question de la permissivité, et notamment lors de la coordination de différents éléments d'un même niveau, pour les spécifications C1, C2, C3 et C4, l'élément qui semble avoir le plus d'impact sur la synthèse du superviseur de coordination est sans conteste le degré de permissivité associé à la spécification (cf. Tableau 3).

| Superviseurs d'EPO (niveau 1) | Spécification F1 | | Spécification F2 | |
|---|---|---|---|---|
| *Coordination* | *Normal* | *Tout marqué* | *Normal* | *Tout marqué* |
| Spec C1 : cycle non permissif | [0,0,0] | [0,0,0] | [0,0,0] | [0,0,0] |
| Spec C2 : cycle permissif | [25,63,2] | [29,77,6] | [41,184,2] | [41,184,41] |
| Spec C3 : cycle non permissif + init | [0,0,0] | [0,0,0] | [0,0,0] | [0,0,0] |
| Spec C4 : cycle permissif + init | [38,106,1] | [38,106,8] | [38,164,1] | [38,164,38] |

**Tableau 3 : Influence de la structure des spécifications sur le résultat de synthèse**

Les spécifications C1 et C3 n'autorisent qu'un seul événement sur chaque boucle (cf. premier automate de la Figure 120) qui correspond, pour chaque état de la spécification, à l'évènement contrôlable (demande de montée/descente, demande de marche/arrêt aspiration, demande avancer/reculer) permettant de suivre le cycle de coordination. Aucun évènement incontrôlable (états du système) non attendu n'apparaît dans ces boucles. Ces spécifications, si elles correspondent à une description du comportement normal du préhenseur, ne permettent pas la synthèse d'un superviseur (cf. Tableau 3). En effet, ces spécifications ne présentent que des états pour lesquels un seul événement non contrôlable est admis (celui attendu), ce qui conduit à considérer ces états comme défendus lors de la synthèse et donc à les éliminer.

L'attitude contraire (cf. deuxième automate de la Figure 120), qui consiste à autoriser en boucles sur les états tous les évènements non contrôlables, aboutit certes à un superviseur mais dont la pertinence peut être remise en cause, puisque celui-ci considèrera comme parfaitement admissible (non défendu) un état pour lequel pourraient être émis deux évènements contradictoires (*état bas / état haut*).

Obtenir le juste milieu (spécifications C2 et C4 (cf. Figure 119)) reste une tâche incertaine, d'autant plus dans le cas d'une spécification obtenue par composition puisque sa permissivité dépend du recouvrement des spécifications unitaires.

Enfin, pour la spécification C4, les résultats restent homogènes (relativement aux spécifications F1 et F2). En effet, les seules différences notables concernent le nombre de transitions. Cette différence est due aux transitions en boucles sur les états associées au maintien des comptes-rendus qui différencie les spécifications F1 et F2.

### *4.4.3. Impact aux différents niveaux de la structure de commande*

Nous venons de voir que les résultats, et même la faisabilité de la synthèse dépendaient beaucoup du savoir faire du modélisateur. Il est donc relativement compliqué d'obtenir des résultats « corrects » sans l'apport d'un spécialiste de la modélisation et de la synthèse.

Afin de parer ce problème, nous avons au plus haut niveau de la commande, un niveau correspondant aux opérations faites sur le produit. Ainsi, les modèles qui sont intégrés au plus haut niveau de la commande reposent plus sur un « métier » (on parlera des opérations à faire sur le produit) plutôt que sur le savoir faire du modélisateur (on utilisera une modélisation simple des spécifications des produits sous la forme d'opérations à réaliser plutôt que sur des commandes opérationnelles à faire pour fabriquer les produits).

## *4.5. Conclusion*

Nous venons de présenter une méthode d'automatisation, utilisant des techniques de synthèse formelle, pour obtenir les modules de l'architecture de commande des équipements contrôlés par le produit *à l'instant t*. Cette approche repose sur une structuration modulaire du contrôle des équipements, sur une utilisation itérative des techniques de synthèse formelle et sur des mécanismes d'interprétation et d'implantation des superviseurs.

Les opérations sur les automates, telles que les compositions, projections, changement de contrôlabilité des événements, ajout d'événements en boucle sur les états et synthèse sont effectuées automatiquement à l'aide du logiciel TCT.

Le développement de l'outil TCT2SPEX permet de systématiser l'interprétation des superviseurs en contrôleurs, automatisant ainsi une partie de notre démarche. Nous avons appliqué notre démarche de synthèse modulaire du contrôle sur un exemple extrait de l'AIPL afin d'en démontrer la faisabilité.

Les modules de contrôle commande résultants sont cohérents avec le contrôle par le produit à travers le temps dans le sens où les spécifications de la commande de ces équipements repose sur un modèle des processus « métier » de fabrication des produits.

Nous avons montré que de l'écriture des spécifications utilisées pour la synthèse dépendait la possibilité d'obtenir un contrôleur. Ce constat renforce notre hypothèse de départ qui est de baser les spécifications de la commande des systèmes contrôlés par le produit non pas sur le savoir faire de l'automaticien, mais plutôt sur un modèle du procédé de fabrication des produits.

# *Chapitre 5*

## Synthèse des trajectoires de production contrôlées par le produit

# Chapitre 5 : Synthèse de trajectoires de production contrôlées par le produit

## *5.1. Introduction*

Ce chapitre a pour objet de présenter une approche de génération automatique (« en-ligne ») du contrôle par le produit de la production *à travers le temps*, pour coordonner les différents équipements du système de production, ou pour assurer le suivi de la production dans des outils de type MES.

Notre contribution se base sur les modèles des équipements et du procédé de fabrication des produits, stockés dans la base de données du MES et qui sont obtenus par la modélisation proposée au chapitre 3, ainsi que sur les techniques classiques de synthèse de la commande.

Pour réaliser cette synthèse, les différents modèles des équipements obtenus au préalable doivent être fusionnés pour ne former qu'un seul modèle global des possibilités du système de production, avec lequel le produit doit assurer sa production. En ce sens, nous proposons une définition formelle de cet opérateur de fusion.

Une fois l'ensemble des trajectoires contrôlées par le produit synthétisées, le choix d'une trajectoire optimale est du ressort de la recherche opérationnelle, hors de notre champ d'investigation. Cependant, pour montrer la faisabilité de notre approche sur l'exemple de l'AIP, nous utiliserons un algorithme de recherche opérationnelle que nous choisissons arbitrairement.

## *5.2. Principe*

Nous avons vu au chapitre 1 que la définition et l'utilisation des trajectoires des produits dans un atelier est faite au niveau du MES. Pour permettre la reconfiguration dynamique de l'outil de production, il est nécessaire de pouvoir synthétiser automatiquement les trajectoires correspondant à de nouveaux produits, ou à des variantes de produits, à l'image de ce qui est proposé par Sormaz & Khoshnevis (2003) ou Henry *et al*. (2004).

A ce niveau de l'architecture du système d'information de l'entreprise toutes les informations nécessaires à une synthèse automatique des trajectoires sont disponibles (Figure 122) : opérations réalisables sur chaque machine, capacités machines, ordres de fabrication, gamme, nomenclature … Il est possible d'utiliser des heuristiques pour générer en temps réel une séquence permettant la fabrication d'un produit (Shin & Cho 2001) à partir d'un modèle de la gamme d'un produit, représenté sous la forme d'un graphe.

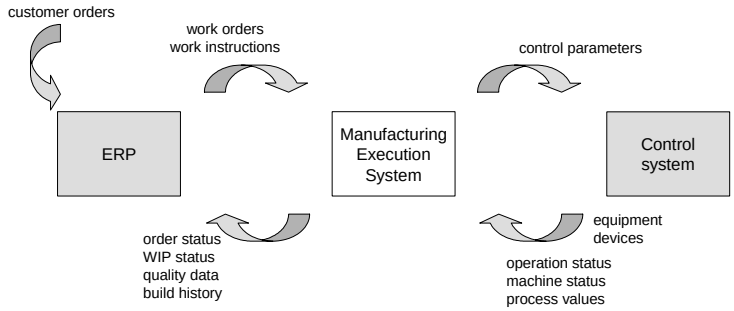



**Figure 122 : Interaction entre le MES et les autres systèmes d'information de l'entreprise**

Qiu *et al.* (2003) proposent une synthèse de ce type. Cette approche a notamment été implantée dans le MES XFactory édité par Tecnomatix. Ainsi, il est possible, à partir de la définition des caractéristiques d'un lot de produits, de déterminer automatiquement des machines pouvant les réaliser.

L'originalité de notre approche par rapport à celle de Qui *et al.* (2003) réside dans le fait que nous combinons cette synthèse de trajectoire du produit avec la notion de contrôle par le produit, et que dans notre cas, les produits ne seront pas fabriqués par lot, mais considérés individuellement. Le produit devient par ce principe le conducteur de sa fabrication. Nous faisons de plus le lien entre le niveau MES et le niveau Contrôle-Commande, puisque notre méthode va permettre de générer le contrôle par le produit des routes de fabrication à partir d'informations du MES.

Les trajectoires synthétisées doivent permettre de fabriquer le produit tout en respectant les spécifications du produit, c'est-à-dire le plan ou la gamme de fabrication du produit. Cette dernière est donnée sous la forme d'opérations fonctionnelles (ou de processus) devant être appliquées sur le produit. L'affectation des diverses ressources se fait en fonction de leur capacité et de leurs possibilités de production. Cela implique que les services des stations de travail sont donnés sous la forme d'opérations supportées, comme c'est généralement le cas dans les MES (Figure 123).

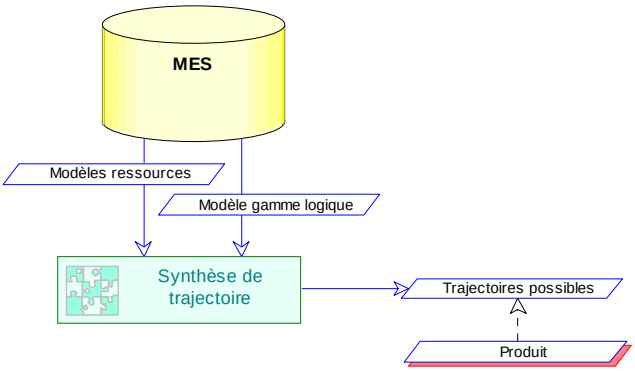



**Figure 123 : Synthèse de trajectoire à partir d'informations de la base de données du MES**

La situation dans laquelle nous nous plaçons est relativement proche de la notion de « bus fonctionnel » (Munerato 1988) dans le sens où les opérations faites sur le produit ne sont pas commandées en fonction de la technologie des éléments opératifs, mais en fonction des processus à réaliser. La différence par rapport à ces travaux est que dans notre cas le niveau

fonctionnel n'est pas géré par le système d'information du niveau cellule ou atelier, mais par le produit lui-même.

En ce sens, notre approche cherche à résoudre notre seconde interprétation du prédicat d'automatisation de Fusaoka *et al.* (1983):

$$\begin{array}{ll} & \textit{Comportement des processus de fabrication} \\ \wedge & \textit{Règles inconnues de contrôle par le produit de la production} \\ \supset & \textit{Gamme de fabrication du produit} \end{array} \qquad (3)$$

Ce prédicat va être automatiquement vérifié, comme au chapitre précédent, par l'utilisation d'algorithmes classiques de synthèse de superviseur (Wonham & Ramadge 1987). Ainsi, afin d'éviter les problèmes relatifs au savoir faire du modélisateur, nous basons nos modèles sur le métier de l'ingénierie produit/processus, c'est-à-dire sur la suite d'opérations à réaliser sur les produits que nous avons modélisée au chapitre 3. De plus, pour assurer la cohérence avec le contrôle des ressources, nous utilisons les modèles de spécification des différents équipements qui vont réaliser les produits. En ce sens, les règles de contrôle par le produit vont être déterminées à partir du modèle de comportement des équipements assurant la fabrication et de la gamme logique des produits.

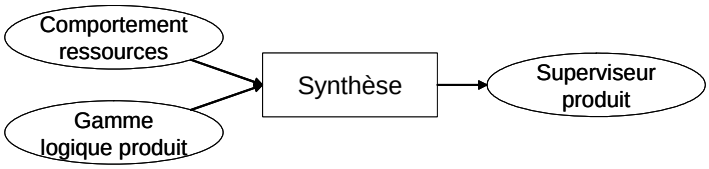



**Figure 124 : Principe de la synthèse des règles de contrôle par le produit**

## *5.3. Synthèse de trajectoire*

La synthèse nécessite en amont une phase d'obtention des modèles des spécifications des produits et des comportements des équipements de production, et en aval une phase d'interprétation permettant l'utilisation des résultats.

### *5.3.1. Modèles nécessaires à la synthèse*

#### 5.3.1.1 Modèle de spécification : les procédés de fabrication des produits

Les plans de fabrication des produits sont élaborés par leurs concepteurs. D'un point de vue du contrôle, cet ensemble ordonné d'opérations que le produit doit subir pour être fabriqué peut être représenté sous la forme d'un automate à états finis (Figure 125). Ce dernier est composé des événements correspondant à l'achèvement des différents processus de transformation, exprimés dans un langage de spécification des tâches comme le préconise Košecká (1995)

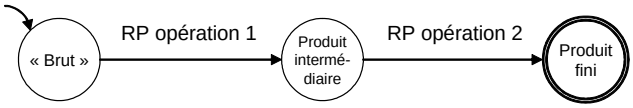



**Figure 125 : Exemple de gamme logique représentée sous la forme d'un automate à état finis**

Cet automate correspond à *un ensemble d'opérations liées par une relation d'antériorité*, c'est-à-dire la gamme logique des opérations à réaliser (Cruette 1991).

D'un point de vue de la synthèse, ce modèle de gamme logique doit être complémenté afin d'être utilisable. En effet, il est nécessaire que ce modèle tolère toutes les requêtes possibles (d'un point de vue de la spécification, on ne sait pas lesquelles émettre), et tolère tous les déplacements à chaque état (on ne sait pas sur quelle ressource vont être effectuées les transformations). De plus, il est possible, au niveau du dernier état, de ne plus autoriser de requête ni de déplacement si l'on considère que le produit est terminé (Figure 126).

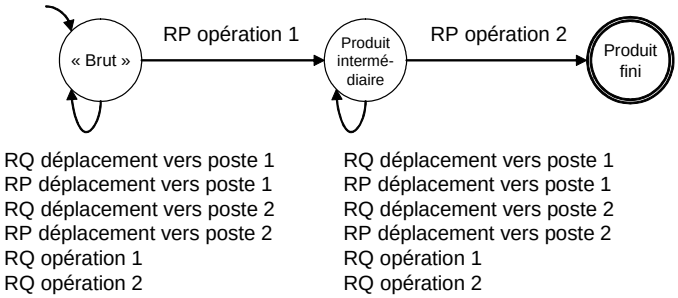



**Figure 126 : Modèle de la gamme logique utilisée pour la synthèse**

#### 5.3.1.2 Modèle des ressources de production : fusion des modèles unitaires

La phase de modélisation (chapitre 3) nous donne les modèles de spécification des différentes ressources qui composent le système de production (Figure 127). Pour la synthèse du contrôle par le produit, nous avons besoin d'un seul modèle du système réalisant les opérations de transformations. Il nous faut donc procéder à une composition des différents modèles des équipements. L'opération classique de composition synchrone ne convient pas dans ce cas car elle ne tient pas compte des relations spatiales entre les différents équipements. Par exemple, suite à un déplacement vers le poste 2, seules les opérations proposées ce poste doivent être possibles ; la composition synchrone proposerait également les opérations des autres postes.

Par conséquent, nous définissons un opérateur permettant la fusion des modèles des postes de travail, et de la (ou des) ressource(s) de transport, dans l'esprit de la composition conditionnelle présentée par Košecká (1995). Cet opérateur nous permet ainsi d'obtenir un modèle unique regroupant les possibilités de chaque ressource, en fonction de leur situation spatiale.

Notre opérateur de fusion se base sur une fusion des états des modèles partiels qui sont équivalents, c'est-à-dire dans lesquels la situation spatiale du produit et l'opération qui lui est faite sont les mêmes dans les deux automates.

Dans l'exemple de la Figure 127, les états « au poste 1 » de la ressource de déplacement et l'état « poste 1 libre » du modèle du poste 1 doivent être fusionnés, de même que les états « au poste 2 » de la ressource de déplacement, et « poste 2 libre » du modèle du poste 2.

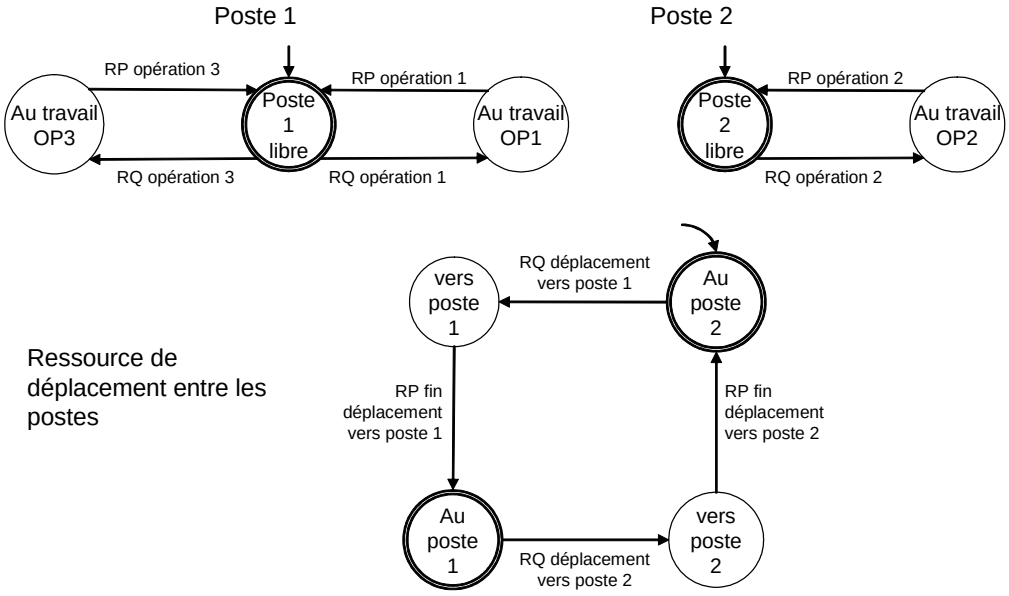



**Figure 127 : Exemples de modèles de ressources contrôlées par le produit : 2 postes de travail et une ressource de transport**

Formellement, une définition de cette fusion d'automate peut être :

Un automate fini déterministe est un 5-uplet $G = (X, \Sigma, \alpha, x_0, X_m)$ dans lequel :

- $X$ est l'ensemble fini des états x,
- $\Sigma$ est l'ensemble des événements $\sigma$ associés aux transitions de G,
- $\alpha : X \times \Sigma \rightarrow X$ est la fonction de transition ; $\alpha(x_1,c) = x_2$ signifie qu'il y a une transition entre l'état $x_1$ et l'état $x_2$ portant l'événement $c$, ; de plus cette fonction est déterministe dans le sens où elle associe au maximum un état $x_2$ à tout couple $(x_1,c)$
- $x_0$ est l'état initial,
- $X_m \subseteq X$ est l'ensemble des états marqués.

Soient $G_1 = (X_1, \Sigma_1, \alpha_1, x_{0,1}, X_{m,1})$ et $G_2 = (X_2, \Sigma_2, \alpha_2, x_{0,2}, X_{m,2})$ deux automates finis déterministes, pour lesquels $\Sigma_1 \cap \Sigma_2 = \varnothing$ et $X_1 \cap X_2 = \varnothing$,

Soit *sit :* $X_1 \cup X_2 \rightarrow \Re^3 \times F$ une fonction donnant la situation d'un produit dans un état $x \in X_1 \cup X_2$ :

- coordonnées spatiales (sur $\Re^3$),
- opération en cours sur le produit (sur $F = \{op_1, op_2, \ldots, op_n, 0\}$, ensemble des opérations possibles, 0 signifiant que le produit ne subit pas d'opération).

Si $\exists\ (e_1, e_2) \in X_{m1} \times X_{m2} / sit(e_1) = sit(e_2)$ alors il est possible de fusionner l'automate $G_2$ sur l'automate $G_1$[12], en fusionnant les états $e_1$ et $e_2$. Dans le cas contraire, cette fusion n'est pas possible. On définit alors une relation d'équivalence sur les états et on notera $\dot{e}$ la classe d'équivalence des états $e_1$ et $e_2$ qui vont être fusionnés, et $\dot{x}$ la classe d'équivalence de l'état $x \in X_1 \cup X_2 - \{e_1, e_2\}$.

[12] La relation n'est pas symétrique. En effet, l'état initial de l'automate résultant correspondra à celui de l'automate $G_1$

L'automate $G = (X, \Sigma, \alpha, \dot{x}_0, X_m)$ résultant de la fusion de $G_2$ sur $G_1$ en ($e_1$,$e_2$) est défini par :

$$X = \{\dot{e}\} \cup \{\dot{x}_1 / x_1 \in X_1 - e_1\} \cup \{\dot{x}_2 / x_2 \in X_2 - e_2\}$$
$$\Sigma = \Sigma_1 \cup \Sigma_2 \ avec\ \Sigma_1 \cap \Sigma_2 = \varnothing;$$
$$si\ x_{0,1} \neq e, \quad alors\ \dot{x}_0 = (\dot{x}_{0,1});$$
$$si\ x_{0,1} = e, \quad alors\ \dot{x}_{0,1} = \dot{e};$$
$$X_m = \begin{cases} \{\dot{x}_{m,1} / x_{m,1} \in X_{m,1}\} \cup \{\dot{x}_{m,2} / x_{m,2} \in X_{m,2}\} & si\ e_1 \notin X_{m,1}\ et\ e_2 \notin X_{m,2} \\ \{\dot{x}_{m,1} / x_{m,1} \in X_{m,1} - \{e_1\}\} \cup \{\dot{x}_{m,2} / x_{m,2} \in X_{m,2} - \{e_2\}\} \cup \{\dot{e}\} & si\ e_1 \in X_{m,1}\ ou\ e_2 \in X_{m,2} \end{cases}$$

$$x \in X,$$
$$\sigma \in \Sigma,$$
$$\alpha : X \times \Sigma \rightarrow X;$$
$$\alpha(\dot{x}, \sigma) = \begin{cases} \dot{x}_1 / \alpha_1(x,\sigma) = x_1 & si\ \sigma \in \Sigma_1\ et\ \alpha_1(x,\sigma) \neq e_1 \\ \dot{e} & si\ \sigma \in \Sigma_1\ et\ \alpha_1(x,\sigma) = e_1 \\ \dot{x}_2 / \alpha_2(x,\sigma) = x_2 & si\ \sigma \in \Sigma_2\ et\ \alpha_2(x,\sigma) \neq e_2 \\ \dot{e} & si\ \sigma \in \Sigma_2\ et\ \alpha_2(x,\sigma) = e_2 \\ non\ défini & dans\ les\ autres\ cas \end{cases}$$

Lorsqu'il existe plusieurs paires d'états équivalents, il est possible de procéder à cette fusion de manière itérative, ou en une seule fois.

Ainsi, en fusionnant successivement les automates représentant les postes 1 et 2 de la Figure 127 à celui de la ressource de transport, nous obtenons l'automate de la Figure 128 qui correspond au modèle du système à contrôler du point de vue de la synthèse. Les états appelés « au poste i » représentent les états « *libre* » des stations de travail i, alors que les états appelés « vers poste i » représentent l'utilisation d'une ressource de transport entre ces stations de travail.

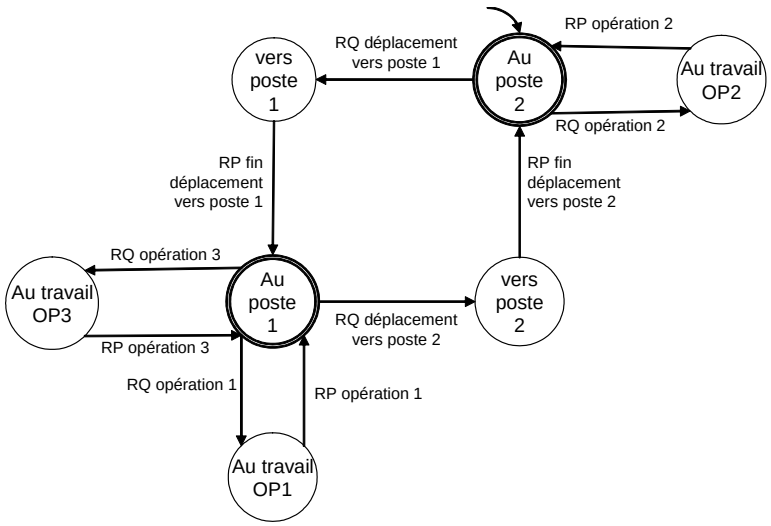



**Figure 128 : Exemple de modèle obtenu par fusion de 2 stations de travail et d'une ressource de transport**

Cet automate représente l'ensemble des opérations qui sont possibles avec le système de production.

## *5.3.2. Résultat de la synthèse de trajectoire*

Des techniques de synthèse classiques (Wonham & Ramadge 1987) peuvent alors être utilisées pour obtenir un superviseur contrôlant les trajectoires possibles d'un produit dans la cellule (Figure 129).

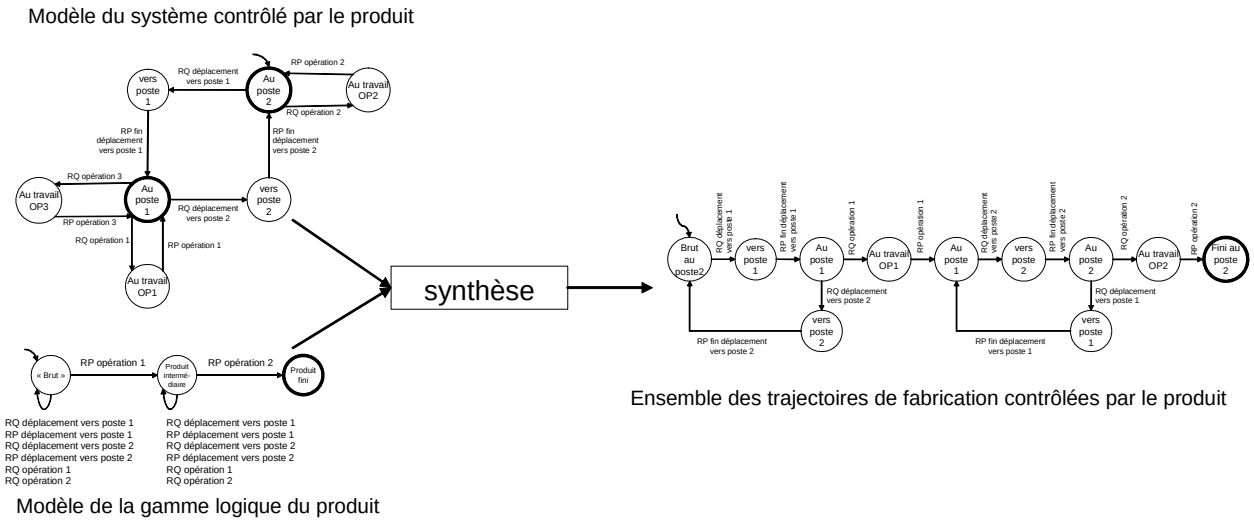



**Figure 129 : Principe de la synthèse des trajectoires**

Ce superviseur synthétisé représente l'ensemble exhaustif des trajectoires que le produit peut choisir pour être fabriqué en respectant la gamme spécifiée (Figure 130). Bien entendu, certaines trajectoires ne sont pas optimales, car elles enchaînent des déplacements successifs qui sont inutiles. Un choix doit être fait pour déterminer quelle est la trajectoire optimale à l'instant *t* parmi celles qui ont été synthétisées.

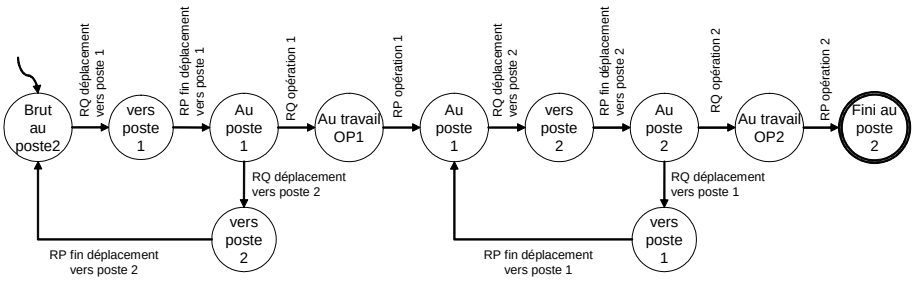



**Figure 130 : Ensemble des trajectoires de fabrication contrôlées par le produit qui sont possibles**

Le superviseur est généré pour un type de produit sur une installation. Cela sous-entend que les différents éléments de l'installation sont tous disponibles, et qu'ils resteront disponibles tout au long de la fabrication des produits de ce type. Cette synthèse est appelée « hors-ligne », dans le sens où elle peut se faire sans tenir compte de l'état présent des installations.

Une extension de cette synthèse « hors ligne » est la synthèse « en-ligne », c'est-à-dire que l'opération de synthèse sera faite lors de l'arrivée du produit dans l'atelier ou dans la cellule de fabrication, en fonction de l'état courant des ressources et des stocks disponibles. Pour cela, il suffit d'utiliser les modèles des postes de travail disponibles dans le MES, et de les adapter en fonction de l'état courant de chaque ressource lors de la création du produit ou de son arrivée dans la cellule ou l'atelier. En effet, la base de données du MES contient les informations concernant les disponibilités et les stocks de chaque ressource. Cela signifie que si une machine est occupée lors de l'arrivée du produit, elle ne sera pas *libre* à l'état initial ; de même, le modèle d'une machine n'étant plus en mesure de faire une opération (épuisement de stock par exemple) ne possédera plus les requêtes (RQ) et les comptes-rendus (RP) correspondant à l'opération qui n'est plus réalisable.

## *5.3.3. Utilisation des trajectoires synthétisées*

Ces trajectoires synthétisées à l'aide de techniques formelles de synthèse peuvent être utilisées de plusieurs manières. Si elle permettent d'une part d'assurer le contrôle par le produit, elles représentent également des informations dynamiques sur les trajectoires des produits, utiles pour assurer le suivi de la production à l'aide d'un outil de type MES.

### 5.3.3.1 Pour le contrôle par le produit

L'automate synthétisé représente l'ensemble des trajectoires de commande que le produit peut emprunter pour contrôler sa fabrication. Ce superviseur peut être utilisé comme contrôleur en considérant les requêtes comme « contrôlables » et les comptes-rendus « incontrôlables » par le produit. Ces événements sont respectivement reçus / émis par les contrôleurs des postes d'assemblage.

Cependant, une partie des chemins que présente cet exemple est dénuée de sens. En effet, il paraît inutile de déplacer un produit vers un poste si ce poste ne peut effectuer l'opération suivante alors qu'il aurait été possible de le transporter directement sur un poste pouvant la réaliser. En ce sens, les trajectoires de ce superviseur qui présentent des successions de déplacements peuvent être inutiles. Ces trajectoires sont possibles, mais n'étant pas optimales, elles ne doivent normalement pas être sélectionnées lors du choix d'une trajectoire.

#### 5.3.3.1.1 Choix d'une trajectoire parmi l'ensemble des trajectoires possibles

Pour pouvoir utiliser cet automate correspondant au superviseur du produit, il reste encore à le rendre déterministe afin d'en faire un contrôleur, à l'image de ce qui est proposé au chapitre précédent. En effet, pour pouvoir conduire sa production, le produit a besoin de connaître non pas toutes les trajectoires qu'il peut emprunter, mais une seule qu'il devra suivre. Un choix doit donc être fait, et ce de manière à optimiser la fabrication du produit et le fonctionnement du système de production, en fonction de différents critères, tels que le coût, l'occupation des postes ou la durée de fabrication. Ce choix est du ressort de la fonction d'ordonnancement, que nous considérons en dehors de notre champ d'investigation. Cependant, nous proposons tout de même un exemple d'algorithme de choix pour montrer la faisabilité de notre démarche.

Ce choix peut être effectué en fonction de la disponibilité des machines, de règles expertes, comme dans (Gouyon *et al.* 2004-1), de techniques d'intelligence artificielle (négociation

multi-agents), de techniques de parcours de graphe (recherche opérationnelle pour déterminer le coût ou le temps optimal), ou encore des techniques plus empiriques de choix.

Nous choisissions, par exemple, d'utiliser comme critère de choix le temps minimal pour parvenir à l'état final du produit. Les informations nécessaires à ce calcul (temps opératoires associés à chaque opération, nombre de pièces en attente sur chaque ressource ou chaque cellule) sont des informations qui sont disponibles dans la base de données du MES (Figure 131).

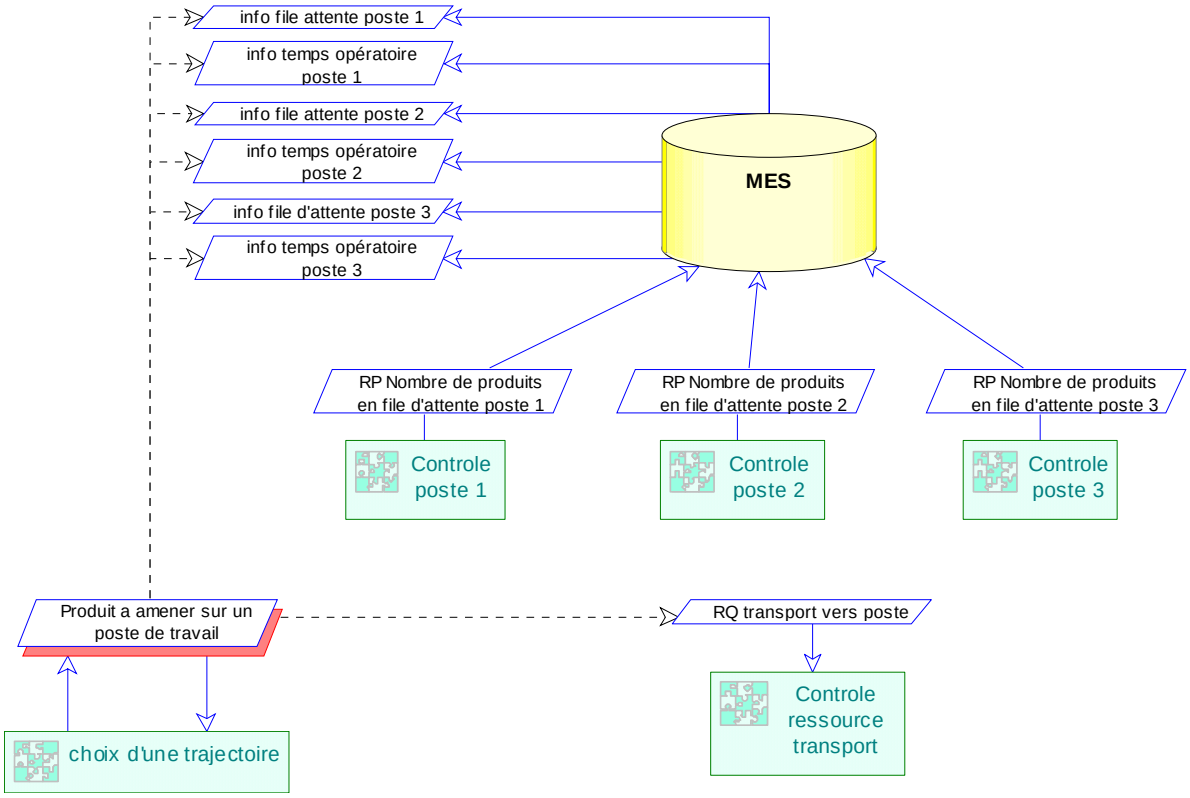



**Figure 131 : Les informations nécessaires à la prise de décision par le produit sont disponibles dans la base de données du MES**

En appliquant un algorithme de recherche opérationnelle pour déterminer le plus court chemin, comme l'algorithme de Dijkstra (Faure *et al.* 2003), il est possible au produit de prendre une décision à l'instant *t* en fonction des disponibilités et des files d'attentes au niveau de chaque ressource. Pour éviter les blocages, le produit peut avoir à reprendre une décision sur le choix de la trajectoire à suivre à chaque fois qu'il y a plusieurs directions possibles, les files d'attentes et l'état de fonctionnement (en marche, à l'arrêt, en panne) de chaque ressource évoluant dans le temps.

#### 5.3.3.1.2 Algorithme de Dijkstra[13] (Faure *et al.* 2000)

Pour montrer la faisabilité de notre approche, nous présentons ici l'algorithme de Dijkstra, qui permet de déterminer le plus court chemin pour parcourir un graphe.

[13] http://www.cs.utexas.edu/users/EWD/

Soient G un graphe dont les valuations *v(i,j)* des arcs sont toutes positives, S l'ensemble des sommets $s_i$ de ce graphe, et $\lambda_i$ la marque du sommet $s_i$, $\lambda_0$ étant la marque du sommet initial $s_0$ du graphe. Ce graphe sera dans notre cas obtenu depuis l'automate représentant l'ensemble des trajectoires possibles (superviseur), en remplaçant les événements sur les transitions par le temps nécessaire à les obtenir (Figure 132). Les temps d'émission des requêtes seront considérés comme nuls, et les temps d'obtention des comptes-rendus de fin d'opération (RPi) correspondent au temps opératoire moyen multiplié par le nombre de produits en file d'attente à l'instant t sur la ressource réalisant l'opération (ces informations sur les temps opératoires sont disponibles dans la base de données du MES) :

*poids d'un arc RQ = 0*
*poids d'un arc RP = temps opératoire * nombre de produits en attente sur ce poste*

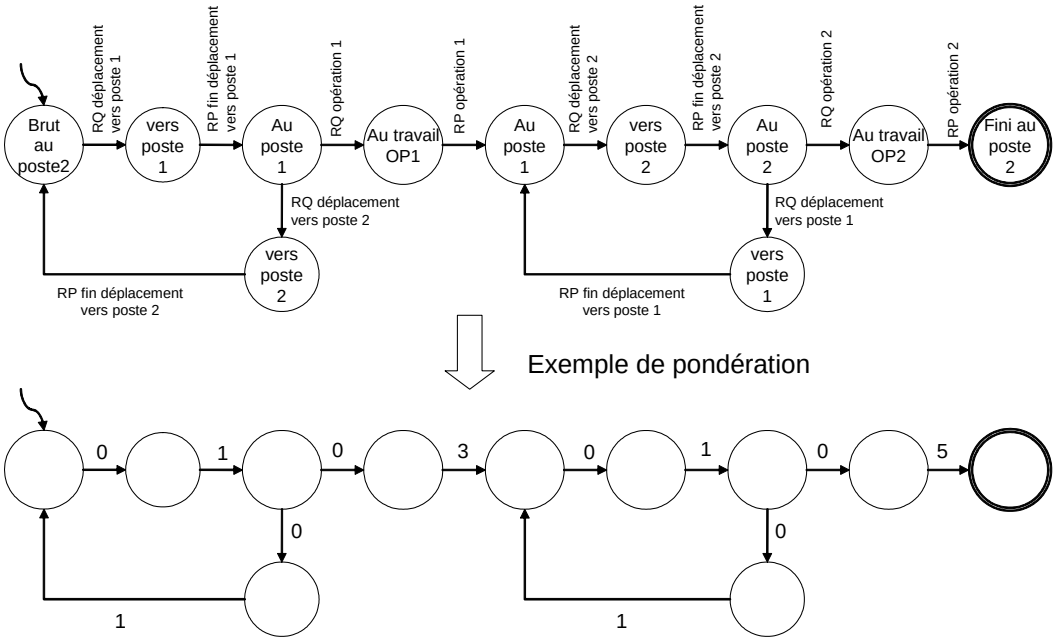



**Figure 132 : Interprétation de l'automate des trajectoires possibles en graphe pondéré**

Dans cet algorithme, le traitement d'un sommet consistera à examiner tous les arcs ayant ce sommet pour origine. Les sommets ne seront traités qu'une seule fois, selon un ordre déterminé au cours de l'algorithme.

- initialement, $\lambda_i \leftarrow +\infty$, pour $i \neq 0$ ; $\lambda_0 \leftarrow 0$ ; tout sommet est « non-traité » ;
- tant qu'il reste au moins un sommet non traité, faire
  - soit $s_i$ un sommet non traité, de valeur $\lambda_i$ minimale parmi les sommets non traités, pour tout arc (i,j), faire
    - si $\lambda_i + v(i,j) < \lambda_j$ alors $\lambda_j \leftarrow \lambda_i + v(i,j)$
  - le sommet $s_i$ est « traité »

La Figure 133 présente un exemple de déroulement de l'algorithme. Initialement, le produit se trouve dans l'état correspondant au sommet *s0*. Il s'agira dans cet exemple de déterminer les plus courts chemins pour le produit pour évoluer de *s0* (ce sommet correspond à l'état « produit au poste 1 ») jusqu'à l'état final *s10*. Les sommets traités sont grisés alors que le sommet en cours de traitement est cerclé d'un trait épais.

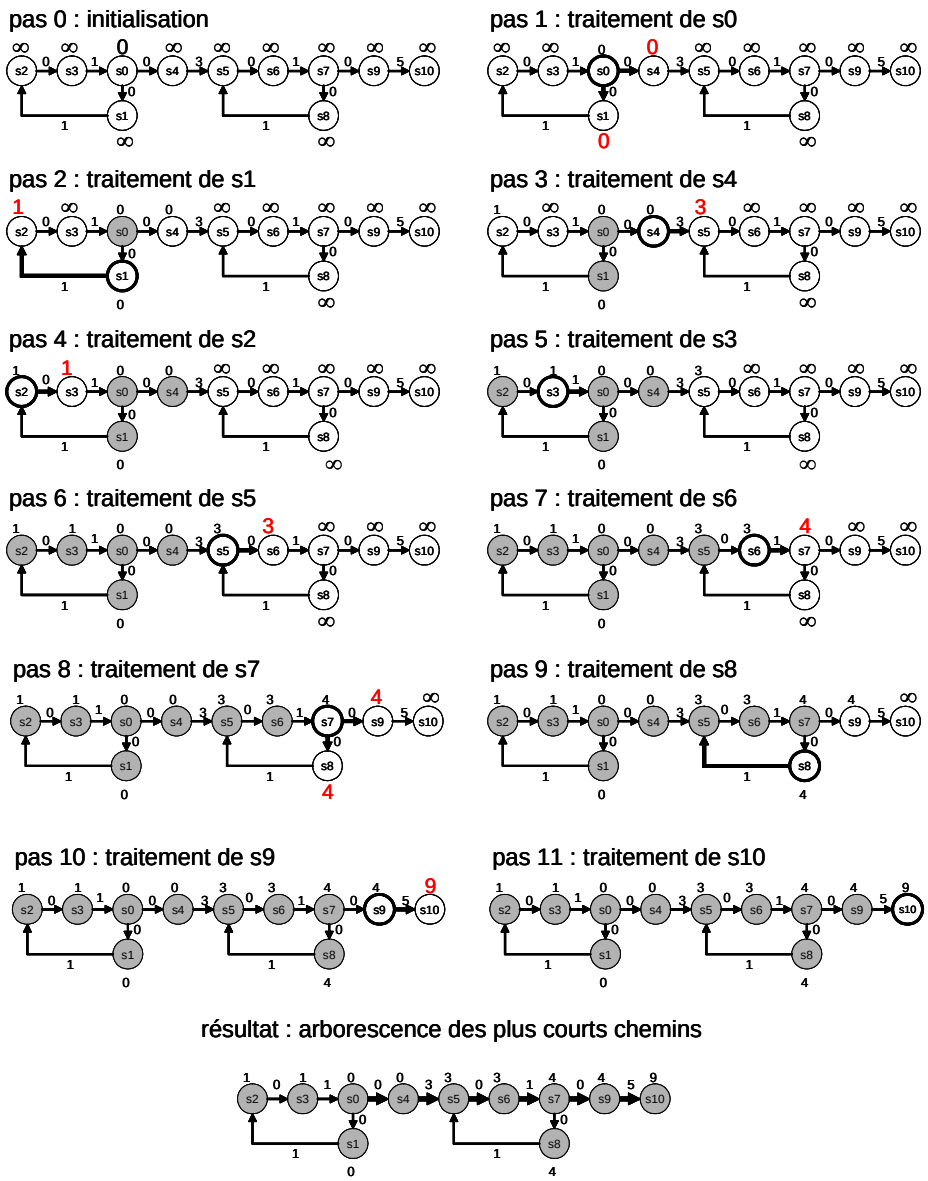



**Figure 133 : Exemple d'exécution de l'algorithme de Dijkstra**

Une fois que tous les sommets sont traités, il suffit de « remonter » le chemin le plus court, c'est-à-dire dont les sommets ont le poids le plus faible. Dans le cas de cet exemple, le produit prendra donc la décision d'émettre la requête *RQ opération 1* au lieu de d'émettre une *requête de déplacement vers le poste 2* (Figure 134).

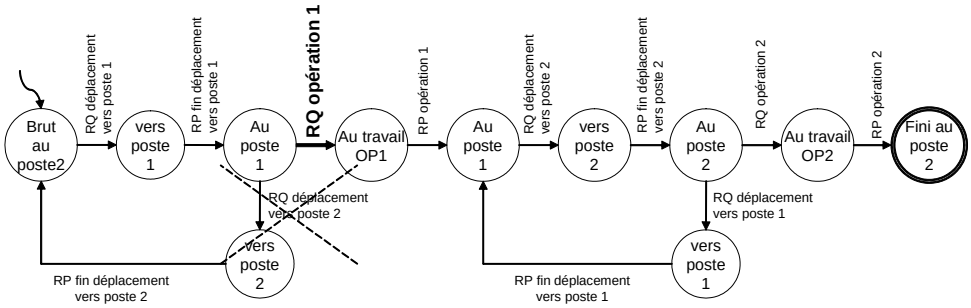



**Figure 134 : Décision prise par le produit au poste 1 : émission de *RQ opération 1***

#### 5.3.3.1.3 Structure de contrôle par le produit

La capacité de prise de décision ne dépend pas du produit sur lequel elle va être utilisée, elle est utilisable sur tous les produits pour lesquels le même type de critère de décision sera appliqué. Pour cette raison, nous considérons la structure informationnelle des produits, au niveau de la prise de décision, comme composée d'une structure d'accueil servant d'interpréteur, et de l'ensemble des trajectoires servant de base de données de référence.

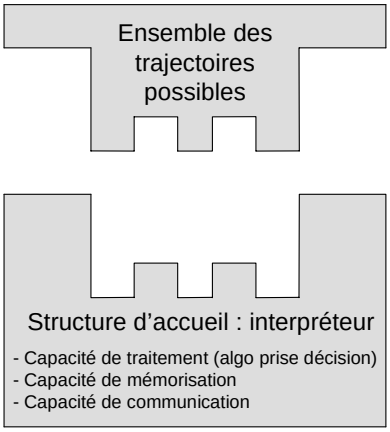



**Figure 135 : Structure d'accueil pour les trajectoires synthétisées**

Cette structure d'accueil sera réutilisable d'un produit à l'autre puisqu'elle n'est pas spécifique à un produit particulier.

#### 5.3.3.1.4 Echanges produits/ressources

Les requêtes émises par le produit, ainsi que les comptes-rendus qu'il reçoit des ressources sont génériques. En ce sens, si plusieurs produits sont en même temps dans le système de production, et s'ils ont besoin d'émettre une requête de même type, ou s'ils attendent le même type de compte-rendu, les problèmes de conflits sont réglés par le fait que les produits n'émettent de requêtes que lorsqu'ils sont au niveau du poste qui va exécuter l'opération, et qu'ils ne quittent ce poste qu'après avoir reçu le compte-rendu de fin d'opération. Nous considérons dans notre approche que les produits ne peuvent pas communiquer en permanence avec les ressources, mais uniquement lorsqu'ils sont sur un poste, via un canal de communication. Si éventuellement le produit venait à ne pas être arrivé devant le « point de dialogue » entre lui et une ressource, l'information qui doit être transmisse serait mise dans un buffer en attendant qu'il soit correctement connecté.

D'un point de vue technologique, cette liaison peut être réalisée à l'aide d'un lecteur d'étiquettes, comme c'est le cas sur le Système Flexible de Production de l'AIPL. Pour cette raison, les requêtes à destination des ressources ne seront vues que par la ressource en question, et la ressource n'émettra le compte-rendu qu'à destination du produit qui vient de subir l'opération.

#### 5.3.3.1.5 Du concept aux possibilités d'implantation

Pour respecter complètement le principe du contrôle par le produit, le contrôleur devrait être embarqué dans le produit, ce dernier disposant d'une capacité de mémorisation, de

communication et de prise de décision. S'il est possible technologiquement d'embarquer une mémoire sur un produit (RFID Tags par exemple), ce n'est pas aussi simple (à ce jour) pour une capacité de prise de décision (un processeur par exemple). Pour cette raison, le contrôleur généré pourra en réalité être exécuté dans un automate chargé d'assurer le contrôle par le produit.

Il est à noter que ce contrôleur est relativement limité par rapport à la complexité d'une prise de décision que nous sommes en mesure d'attendre dans le contexte d'une automatisation contrôlée par le produit. En effet, la spécification présentée Figure 125 doit être enrichie par des modèles de règles de négociation et d'anticipation qui peuvent être basées sur des priorités entre les produits dans la cellule, ou en fonction de la disponibilité des ressources.

Ce type de règles n'est pas facilement représentable dans le formalisme des automates à états finis, et peut donc difficilement être intégré dans cette démarche de synthèse formelle. Ce type de problème est plutôt du ressort des techniques d'Intelligence Artificielle Distribuée appliquées à l'automatisation « agile »[14] (Quinn *et al.* 1997, Newman *et al.* 2000), que nous considérons en dehors du champ d'investigation de la synthèse du contrôle par le produit.

#### 5.3.3.2 Pour le suivi : insertion dans la base de données du MES

Ces trajectoires synthétisées représentent l'ensemble des possibilités qu'a un produit pour être fabriqué. Elles contiennent donc les informations concernant l'ensemble des routes qui peuvent être utiles dans la base de données du MES pour assurer le suivi de la production.

Pour extraire ces routes, il faut tout d'abord projeter les automates synthétisés sur l'alphabet des comptes-rendus (Figure 136). Le graphe obtenu correspond à l'ensemble des routes possibles pour le produit. C'est donc ce graphe qu'il faut insérer dans la base de données du MES pour permettre d'assurer le suivi.

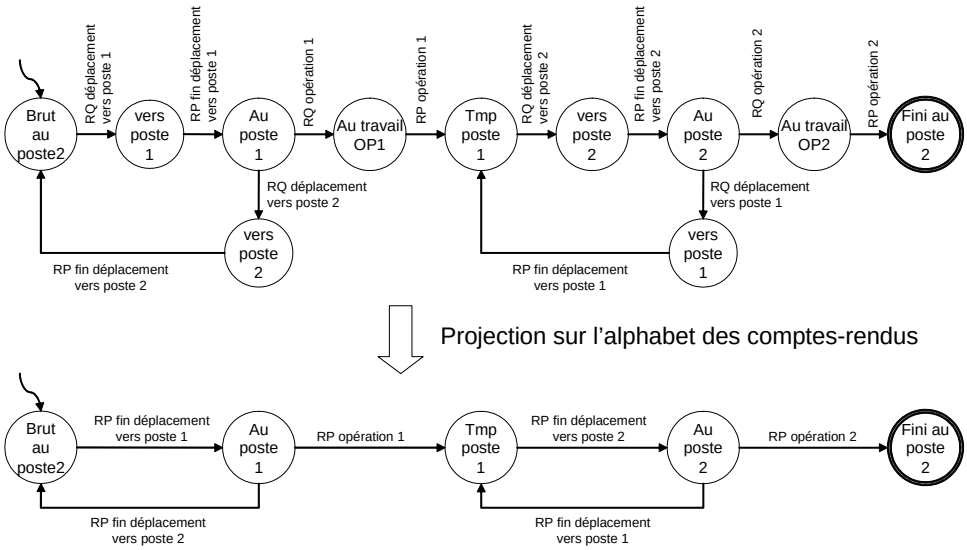



**Figure 136 : Projection sur l'alphabet des comptes-rendus**

[14] http://www.agile-alliance.org

Pour insérer ces routes, il existe des procédures définies sous forme de scripts dans la base de données du MES (Figure 137) qui permettent de créer les routes et tous les éléments nécessaires au suivi de la production.

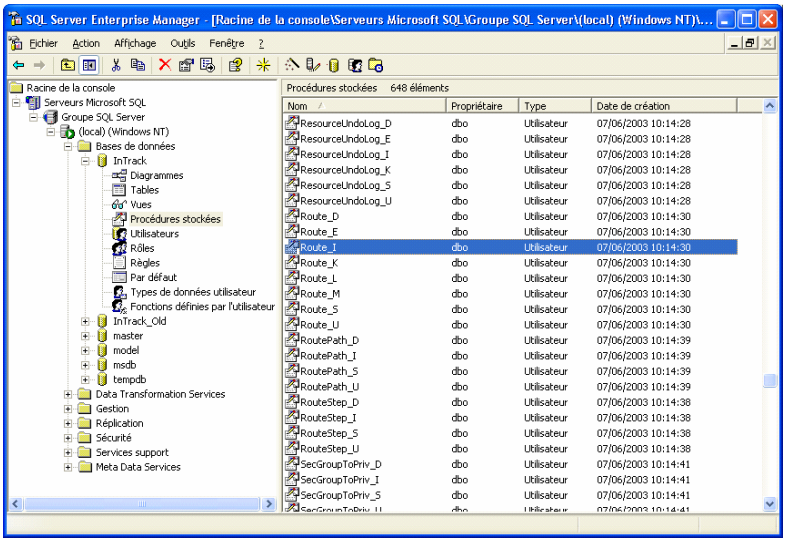



**Figure 137 : Procédures de création des routes dans la base de données SQL du MES InTrack**

L'utilisation de ces procédures permet de compléter dynamiquement la base de données avec les routes synthétisées (Figure 138).

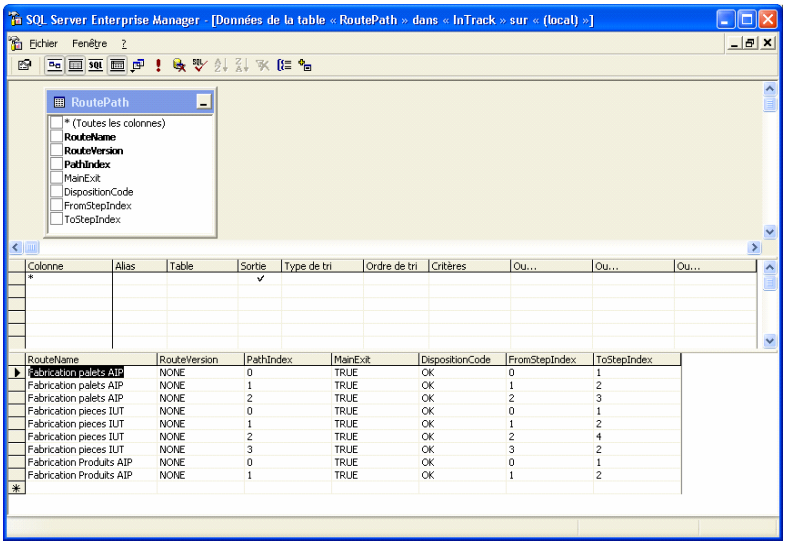



**Figure 138 : Routes disponibles dans la base de données du MES**

## *5.4. Application à un exemple : synthèse du contrôle pour un produit 01-09 assemblé sur le Système Flexible de Production de l'AIP*

Nous faisons quelques hypothèses simplificatrices, mais qui conservent au problème une dimension suffisamment significative pour illustrer notre propos :

- les palettes ne transportent qu'un seul produit. Ceci nous permet de considérer l'emplacement d'un produit sur le SFP comme correspondant à l'emplacement de

la palette qui le transporte. Il n'est pas nécessaire de spécifier la position sur la palette,
- tous les postes ne sont pas utilisés, ils sont dans la configuration décrite au chapitre 3 (poste 1 et 3 non utilisés).

La synthèse des superviseurs des produits est réalisée à partir :
- d'une description des opérations à faire sur le produit (quelles sont les pièces à assembler pour former le produit final),
- d'une description du système de production basée sur les possibilités et les emplacements de chacun des postes d'assemblage disponibles.

### *5.4.1. Description des opérations à faire sur le produit*

Prenons l'exemple de la synthèse du contrôle d'un produit de type 01-09, référencé 0455 (Figure 139).

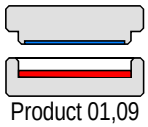



**Figure 139 : Produit de type 01-09 assemblé sur le SFP**

Ce produit est obtenu par l'assemblage d'une pièce 01 et d'une pièce 09. Nous décrivons les opérations en utilisant un alphabet spécifique, composé d'événements de type « Request » (Requête) et « Report » (Compte-rendu), donné dans le Tableau 4. Les requêtes et les comptes-rendus correspondent à un niveau « opérations produit », c'est-à-dire à un niveau fonctionnel, indépendant de la technologie des ressources réalisant les opérations.

| Evénement | Signification |
|---|---|
| $rq_i$ | Requête en vue d'une opération d'assemblage d'une pièce de type i |
| $rp_i$ | Compte-rendu de fin d'une opération d'assemblage d'une pièce de type i |
| rq $pos_j$ | Requête en vue d'un déplacement vers un poste numéro j |
| rp $pos_j$ | Compte-rendu de fin de déplacement vers un poste numéro j |

**Tableau 4 : Alphabet utilisé pour formaliser la synthèse du contrôleur d'un produit 01-09**

Ce produit 01-09 étant obtenu par trois processus successifs, nous pouvons décrire les états successifs de fabrication sous la forme d'un automate à 4 états et 3 transitions, dans lequel le compte-rendu de l'assemblage d'une pièce 01 (RP01) est suivi par le compte-rendu de l'assemblage d'un pièce de type 09 (RP09) puis d'un compte-rendu de déchargement du produit (Figure 140).

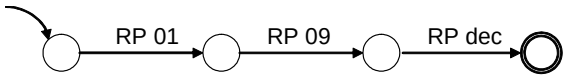



**Figure 140 : Gamme logique de l'assemblage du produit 01-09**

Ce modèle à états doit être complété par l'alphabet de toutes les requêtes et des comptes-rendus de fin de déplacements pour être utilisable pour la synthèse du contrôle par le produit des trajectoires (Figure 141). Nous ne complétons pas le dernier état car nous considérons que tous les événements pouvant survenir après la fabrication sont inutiles.

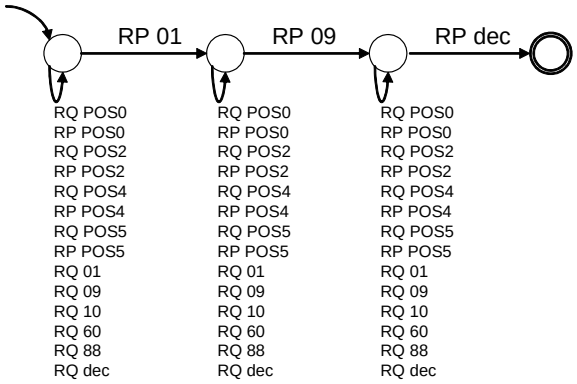



**Figure 141 : Automate de la gamme logique utilisé pour la synthèse**

## *5.4.2. Description des ressources assemblant le produit*

Les modèles des postes d'assemblage sont élaborés selon le modèle générique présenté au chapitre 3, avec les possibilités suivantes pour chaque poste :

- le poste 0 est capable d'assembler des pièces de type 60 et 01,
- le poste 1 n'est pas utilisé,
- le poste 2 est capable d'assembler des pièces de type 09,
- le poste 3 n'est pas utilisé,
- le poste 4 est capable d'assembler des pièces de type 09 et 10,
- le poste 5 est capable de décharger les produits.

De cette façon, nous pouvons formaliser les comportements des différents postes du SFP sous la forme des automates à états de la Figure 142.

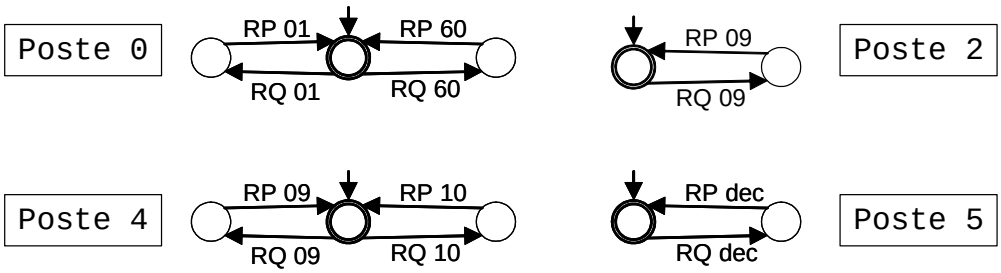



**Figure 142 : Modèles des postes du SFP**

Dans ces modèles les capacités des stocks ne sont pas directement prises en compte. Il s'agit d'une hypothèse simplificatrice. Nous considérons ici une synthèse « en ligne » des trajectoires possibles des produits ; c'est-à-dire que si un poste ne possède pas de pièces d'un certain type, alors, il sera vu comme n'étant pas capable d'assembler des pièces de ce type. Par exemple, nous pouvons considérer que le poste 2 ne dispose plus de pièces 88 qu'il

assemble d'ordinaire, et que les postes 1 et 3 n'apparaissent pas car tous leurs magasins sont vides.

Le modèle du convoyeur est obtenu de la même manière, nous l'avons présenté dans le chapitre 3 Figure 83.

### *5.4.3. Obtention du modèle global des ressources*

Le modèle du système de production, dans notre cas celui du Système Flexible de Production de l'AIPL, est obtenu par fusion des modèles des différents postes d'assemblage, et du modèle du convoyeur. Cette fusion est effectuée selon le mode décrit au paragraphe 5.3.1.2. Ce modèle est celui qui sera utilisé comme modèle de système à contrôler pour la synthèse des trajectoires contrôlées par le produit permettant l'assemblage d'un produit de type 01-09.

En appliquant cette fusion aux modèles des ressources de transport et de transformation de forme de façon itérative, nous obtenons pour notre exemple le modèle de la Figure 143.

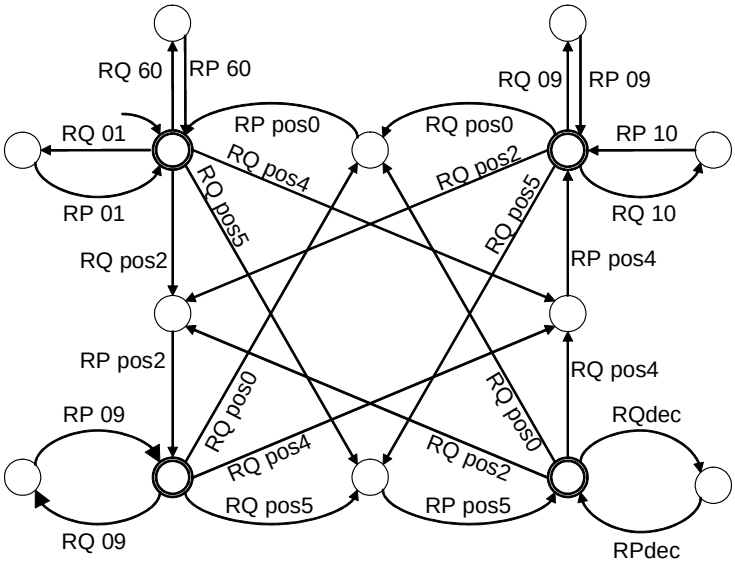



**Figure 143 : Modèle du SFP, d'un point de vue "contrôlé par le produit"**

### *5.4.4. Obtention du superviseur d'un produit*

Le superviseur du produit (Figure 144) est obtenu, à partir du modèle des opérations à réaliser et du modèle du système de production, en appliquant un algorithme de synthèse (Wonham & Ramadge 1987). Ce superviseur limite le comportement du procédé à un comportement compatible avec les spécifications du produit. En d'autres termes, il représente l'ensemble exhaustif des routes possibles pour assembler un produit donné par la cellule, avec le point de vue du contrôle par le produit.

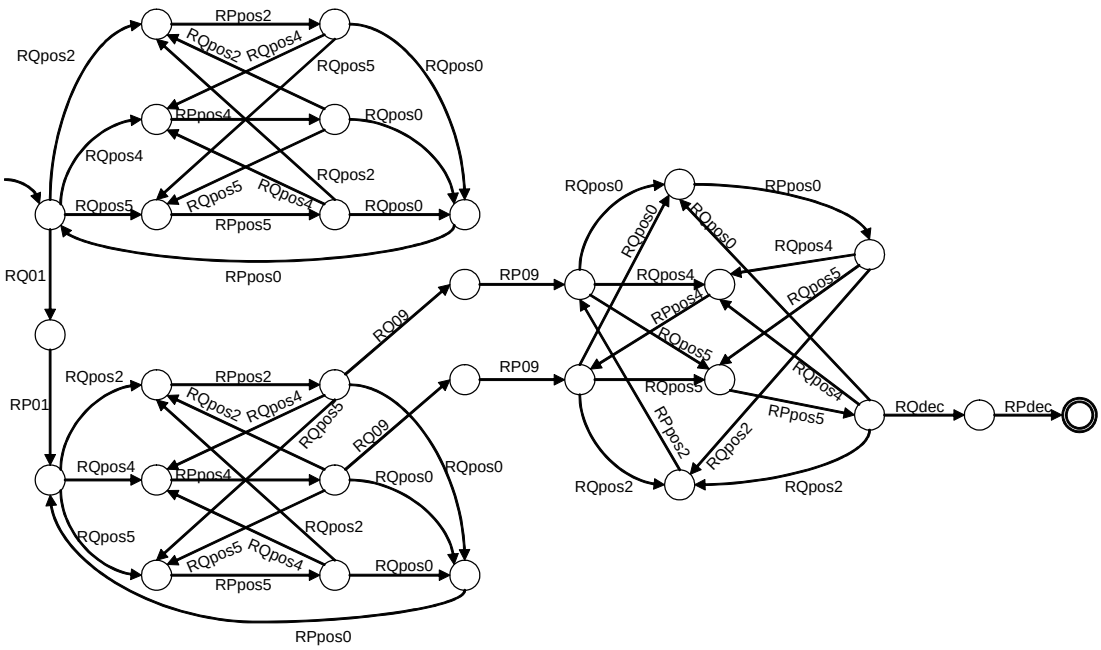



**Figure 144 : Trajectoires possibles pour le produit pour être fabriqué par la cellule**

## *5.4.5. Choix d'une trajectoire*

Pour effectuer le choix de la trajectoire en fonction, par exemple, du temps de fabrication le plus court, il faut transformer cet automate par un graphe ayant la même structure, mais présentant les temps nécessaires au franchissement de chaque transition, à l'instant t. En remplaçant ainsi les événements sur les transitions de l'automate représentant l'ensemble des transitions, selon le mode décrit au paragraphe 5.3.3.1.2, on obtient un graphe orienté pondéré (Figure 145).

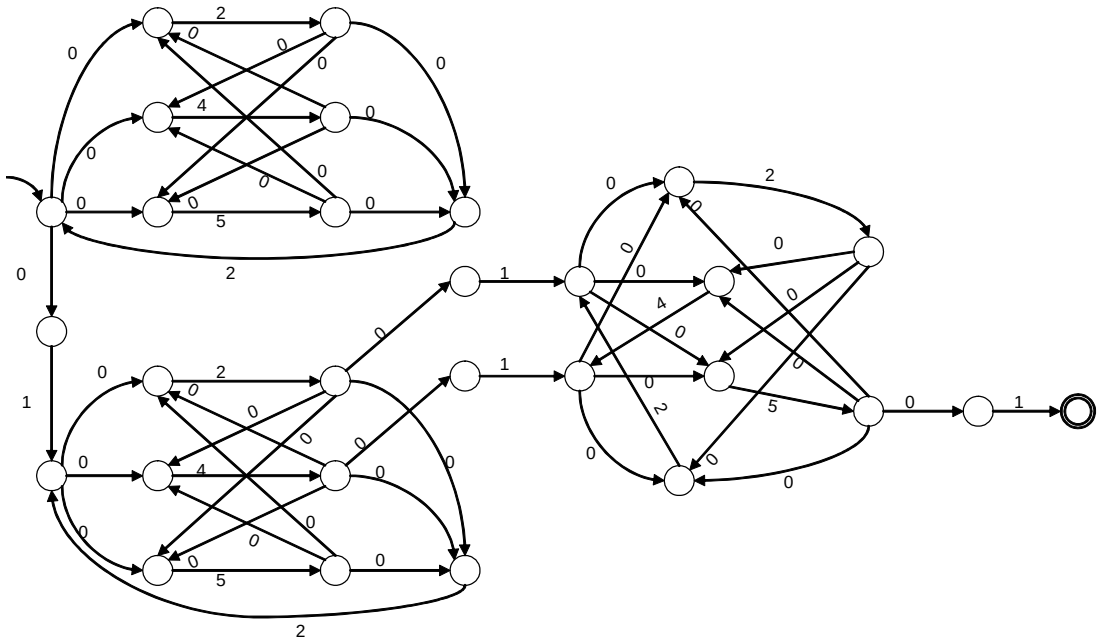


**Figure 145 : Graphe représentant les poids de chaque transition (temps opératoires)**

En appliquant l'algorithme de Dijkstra, nous obtenons la trajectoire ayant le plus le plus faible poids à l'instant t (Figure 146).

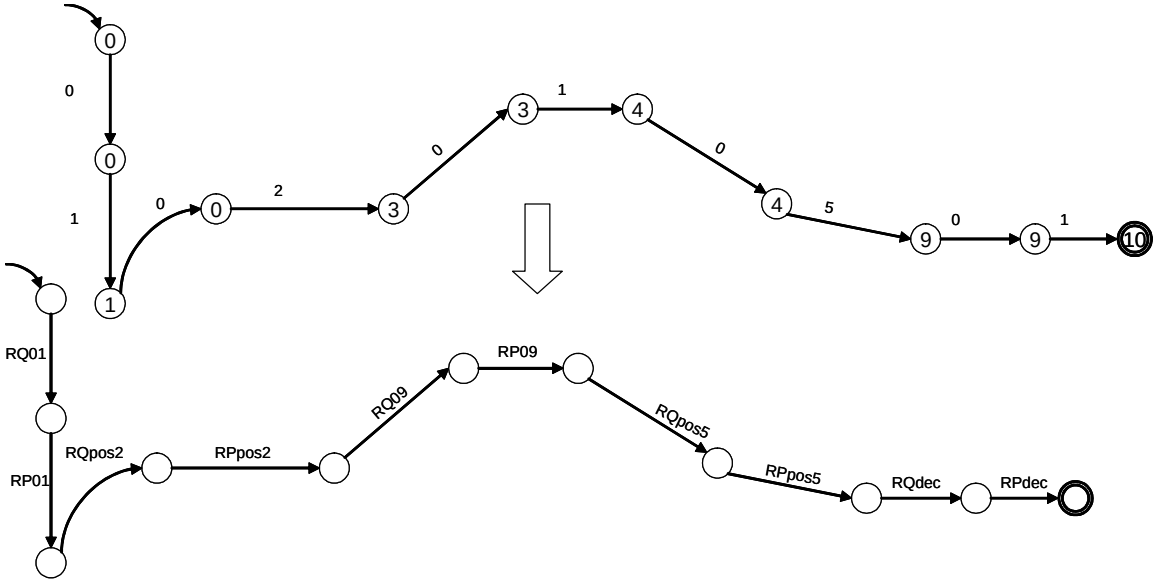



**Figure 146 : Trajectoire choisie parmi celles synthétisées à l'instant t**

Le nombre de produits en file d'attente changeant dans le temps, il est nécessaire de relancer la procédure de choix de trajectoire à chaque fois que le produit arrive sur un état de l'automate qui a plusieurs transitions de sortie.

Nous avons interprété cette trajectoire contrôlée par le produit à l'aide de TCT2SPEX, et nous l'avons vérifiée par simulation avec SPEX (Figure 147).

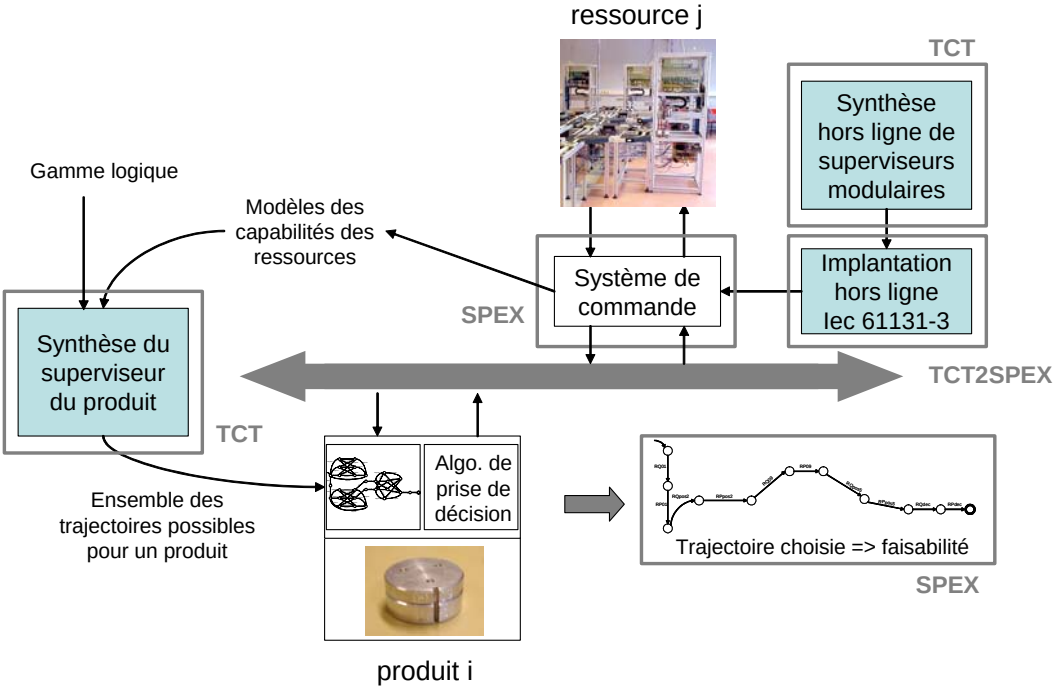



**Figure 147 : Simulation avec SPEX des résultats de synthèse**

## *5.5. Conclusion*

Nous venons de proposer une méthode pour obtenir de façon automatique l'ensemble des trajectoires contrôlées par le produit qui permettent sa fabrication. Comme au chapitre précédent, les opérations de synthèses sont réalisées automatiquement par l'utilisation de techniques formelles de synthèse des SED, implémentées dans le logiciel TCT.

Les trajectoires sont synthétisées à partir des informations du niveau du MES, qui dispose d'informations en temps réel sur l'état et la capacité disponible des machines ainsi que d'informations sur les opérations permettant la fabrication des produits. C'est également lui qui dispose des informations nécessaires au choix d'une trajectoire parmi celles synthétisées (temps de fabrication, occupation machine, …). Par ce lien, la cohérence entre niveau de contrôle-commande et celui du MES est assurée.

# *Conclusion*

# Conclusion et perspectives

## *Conclusion*

Nous avons montré dans notre thèse l'intérêt de contrôler le système de production par le produit dans le cadre d'une production personnalisée, et nous avons posé les fondements d'une ingénierie d'automatisation de ces systèmes en nous appuyant sur les modèles de la norme ANSI/ISA-95 et sur des techniques de synthèse formelle de la commande.

Notre approche d'ingénierie d'automatisation des systèmes contrôlés par le produit (Figure 148) est en lien avec l'ingénierie produit/processus pour la phase de modélisation des procédés de fabrication. Elle assure la génération sûre du contrôle *à l'instant t* des ressources de production et la génération automatique du contrôle par le produit *à travers le temps* des trajectoires de fabrication à partir d'informations du MES, assurant ainsi le lien entre le niveau de la production et celui de son exécution. Elle ouvre également une voie pour faciliter le suivi des instances de produits en proposant d'insérer automatiquement les trajectoires synthétisées dans le MES.

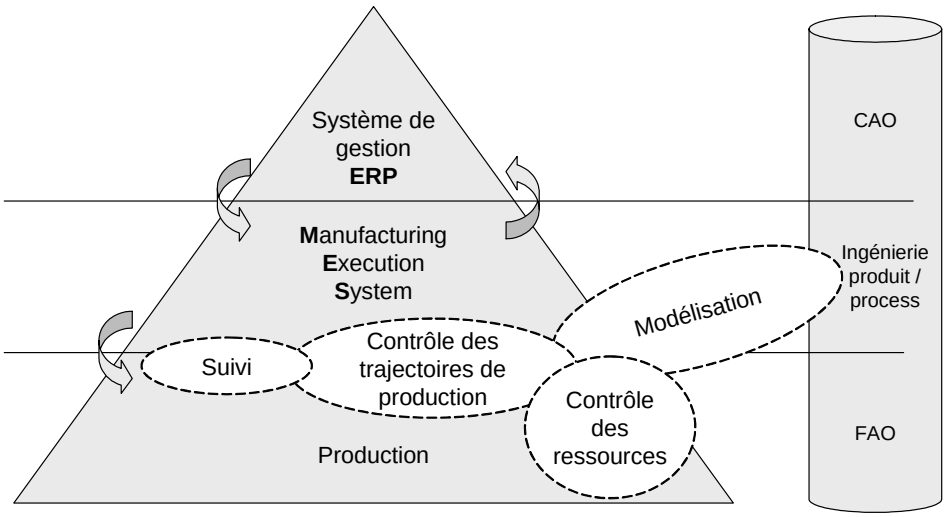



**Figure 148 : Situation des travaux de thèse**

L'utilisation de notre approche passe par différentes phases qui consistent en :

- la modélisation des systèmes contrôlés par le produit afin d'appréhender les processus de production,
- l'extraction des modèles formels nécessaires à la synthèse automatique des règles de contrôle par le produit des ressources et des trajectoires de production,
- deux synthèses, du contrôle des équipements et du contrôle par le produit, dont les originalités sont :
    - pour la première de reposer sur une démarche itérative de mise en œuvre et sur une proposition de règles d'implantation,
    - pour la seconde de se baser sur une modélisation des états du produit et sur une proposition d'opérateur de fusion permettant d'obtenir automatiquement le modèle du système de production à contrôler.

Les travaux présentés dans ce mémoire, ainsi que les concepts, théories, modèles, méthodes, méthodologies, langages et outils que nous avons utilisés et/ou développés sont récapitulés dans la Figure 149.

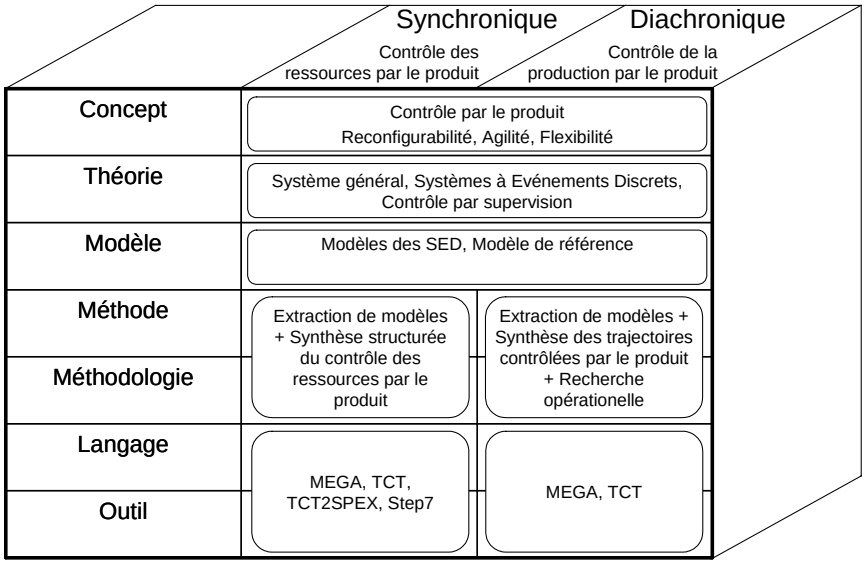



**Figure 149 : Bilan de l'approche proposée**

Nous avons appliqué notre démarche dans le cadre de l'AIPL, et notamment validé notre proposition de synthèse du contrôle par le produit par des simulations à l'aide de l'outil SPEX, ainsi que par des implantations sur les automates du Système Flexible de Production des modules de commande que nous avons synthétisés.

## *Perspectives*

D'un point de vue technique, tous les outils nécessaires à la synthèse et à l'utilisation du contrôle par le produit ne sont pas encore développés. En effet, nous envisageons plusieurs développements (Figure 150) :

- une outil de création des modèles utilisées par la synthèse depuis les informations disponibles dans un MES existant ;
- un outil de synthèse en-ligne supportant notre opérateur de fusion ;
- une implantation du contrôle synthétisé dans les produits, ou de façon plus réaliste, dans des modules logiciels associés à chaque produit mais déportés dans un système de gestion centralisé.

En ce qui concerne le premier point, afin de s'affranchir des spécificités liées aux différents MES du marché, nous envisageons de baser le développement de notre passerelle sur les modèles de la norme ANSI/ISA-95. Toutefois, cette norme n'étant pas directement adaptée à ce type de contrôle, nous pouvons être amenés à en proposer quelques extensions, notamment pour la définition de liens génériques entre les processus de fabrication et leur contrôle.

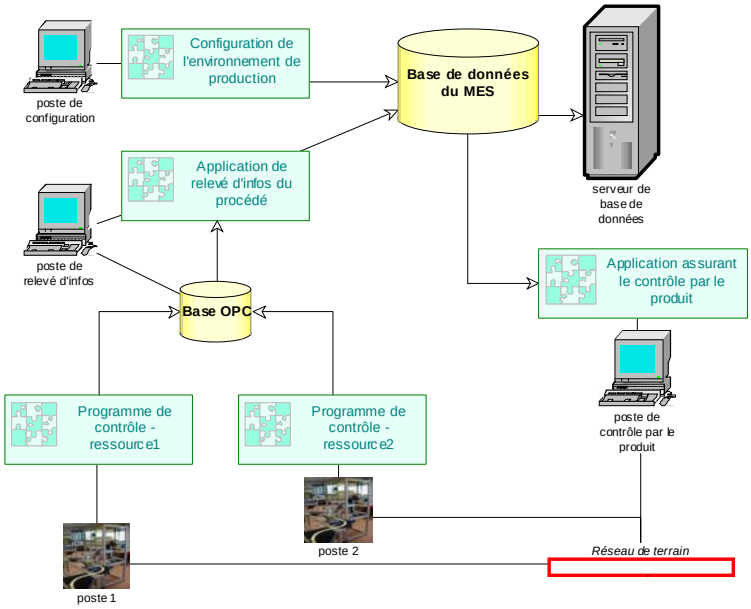



**Figure 150 : Architecture applicative nécessaire à la mise en place d'un MES compatible avec le contrôle par le produit**

L'outil de synthèse en ligne sera basé sur les outils TCT ou sur UMDES[15], l'opérateur de fusion pouvant être quant à lui externalisé dans l'outil en charge de créer les modèles utilisés pour la synthèse.

L'implantation du contrôle par le produit pourra être supportée par des plates-formes logicielles de type multi-agents, qui devront permettre la création et la suppression d'agents de contrôle liés aux produits.

L'ensemble de ces développements fait l'objet de travaux en cours utilisant l'AIPL et sa cellule flexible d'assemblage comme cadre de validation.

[15] UMDES est un outil de synthèse développé à l'Université du Michigan : http://www.eecs.umich.edu/umdes/

# *Références bibliographiques*

# REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES


ACHOUR Z., REZG N., XIE X., Supervisory control of marked graphs with partial observations, *International Journal of Production Research*, vol. 42, N° 14, pp. 2827-2838, 2004

AGUIRRE-SALAS L., BEGOVICH O., RAMIREZ-TREVINO A., Observability with respect to a language in discrete event systems modelled by IPN, Proceedings of 6th International Workshop on Discrete Event Systems, WODES'02, Saragoza, Espagne, 2-4 octobre 2002

ALANCHE P., LHOSTE P., MOREL G., ROESCH M., SALIM M., SALVI P., Application de la modélisation de la partie opérative à la structuration de la partie commande, Journée AFCET « Méthode et outils modernes de conception et d'exploitation de la commande de procédé discontinus complexes », Montpellier, Mars 1986

AMAR S., CRAYE E., GENTINA J.C., Une méthode hiérarchique de spécification et de prototypage des systèmes de production flexibles, *Revue RAIRO APII*, Vol. 26, n° 5-6, pp. 483-514, 1992

ANSI/ISA-95.00.01-2000 (IEC/ISO 62264), *Enterprise-control System Integration Part 1: Models and terminology*, 2000

ANSI/ISA-95.00.02-2001 (IEC/ISO 62264), *Enterprise-control System Integration Part 2: Object Model Attributes*, 2001

AUBERT J.-P., DIXNEUF P., *Conception et programmation par objets, Techniques outils et applications*, MASSON, ISBN 2-225-82496-7, 1991

AUINGER F., BRENNAN R.W., CHRISTENSEN J., LASTRA J., VYATKIN V., Creation of a knowledge economy for intelligent industrial automation: OOONEIDA community in IMS, 11th IFAC Symposium on Information Control Problems in Manufacturing, Salvador-Bahia, Brésil, 5-7 avril 2004

AUTEBERT Jean-Michel, *Théorie des langages et des automates*, Masson, ISBN 2-225-84001-6, 1994

BALEMI S., HOFFMANN G.J., GYUGYI P., WONG-TOI H., FRANKLIN G. F., Supervisory control of a Rapid Thermal Multiprocessor. *IEEE Transactions on Automatic Control*, 38, 7, 1993

BARRET Georges, LAFORTUNE Stéphane, On the synthesis of communicating controllers with decentralized information structures for discrete-event systems, Proceedings of IEEE Conference on Decision and Control, Tampa, Floride, 1998

BARRET Georges, LAFORTUNE Stéphane, A novel framework for decentralized supervisory control with communication, Proceedings of IEEE Systems, Man and Cybernetics, 1998

BELHIMEUR A., Contribution à l'étude d'une méthode de conception des automatismes des systèmes de conduite des processus industriels, Thèse de l'université des Sciences et Techniques de Lille-Flandres-Artois, spécialité automatique, 1989

BIGAND Michel, KORBAA Ouajdi, BOUREY Jean-Pierre, Apport d'UML pour la réalisation d'un outil de conception des systèmes automatisés de production. 4eme Colloque Francophone sur la Modélisation des Systèmes Réactifs, MSR'03, Metz, du 6 au 8 Octobre 2003

BIGAND Michel, KORBAA Ouajdi, BOUREY Jean-Pierre, Integration of FMS performance evaluation models using patterns for an information system design. *Computers & Industrial Engineering*, 46, pp. 625, 637, 2004

BOEL R.K., Automatic synthesis of schedules in a timed discrete event plant, ADPM'2000, Dortmund, Allemagne, 18-19 septembre 2000

BONGAERTS Luc, Integration of scheduling and control in holonic manufacturing systems, Thèse de l'Université Catholique de Louvain, Décembre 1998

BONGAERTS Luc, MONOSTORI László, MCFARLANE Duncan, KADAR Bontond, Hierarchy in distributed shop floor control, *Computers in Industry*, 43, pp. 123-137, 2000

BOURDON Sean E., LAWFORD Mark, WONHAM W.M., Robust nonblocking supervisory control of discrete-event systems, Proceedings of the American Control Conference ACC'02, pp. 730-735, 2002

BOUWENS Jan, ABERNETHY Margaret A., The consequences of customization on management accounting system design, *Accounting, Organisations and Society*, 25, pp. 221-241, 2000

BOUZEGHOUB Mokrane, GARDARIN Georges, VALDURIEZ Patrick, *Les objets*, Eyrolles, ISBN 2-212-08957-0, 1997

BRANDIN B.A., MALIK R., DIETRICH P., Incremental system verification and synthesis of minimally restrictive behaviours. American Control Conference, ACC'00, Chicago, USA, pp. 4056-4061, 2000

BRANDIN Bertil A., MALIK Robi, MALIK Petra, Incremental verification and synthesis of discrete-event systems guided by counter-example, *IEEE Transaction on Control Systems Technology*, à paraître, 2004

BRANDT R.D., GARG V., KUMAR R., LIN F., MARCUS S.I., WONHAM W.M., Formulas for calculating supremal controllable and normal sublanguages, *Systems and control letters*, Vol. 15, N° 2, pp. 111-117, 1990

BRAVE Y., HEYMANN M., Control of discrete event systems modelled as hierarchical state machines, *IEEE Transactions on Automatic Control*, Vol., 38, N° 12, 1993

BRENNAN R., FLETCHER M., ZHANG X., NORRIE D., Reconfiguration of Real-time Distributed Control Systems: An IEC 61499 Based Approach, International Conference on Industrial Engineering and Product Management, Laval, 2001

BRENNAN R.W., HALL K., MARIK V., MATURANA F., NORRIE D.H., A real-time interface for holonic control devices, HOLOMAS'03, 1st International Conference on Application of Holonic and Multi-agent Systems, 1-3 septembre 2003

BROCK David L., The virtual Electronic Product Code, *Auto-Id Center White paper*, 2002

BRUECKNER Sven, MASCADA Manufacturing control systems capable of managing production change and disturbances – An application of autonomous cooperating agents, Agentlink (The

European Network of Excellence for Agent-Based Computing), Newsletter 1, pp. 16-19, Novembre 1999

BUSSMANN Stefan, An agent-oriented architecture for holonic manufacturing control, First open workshop IMS Europe, Lausanne, 1998

BUSSMAN Stefan, MCFARLANE Duncan C., Rationales for holonic manufacturing control, Proceedings of 2nd International Workshop on Intelligent Manufacturing Systems, pp. 177-184, Louvain, Belgique, 1999

CALDWELL Robert M., FERNANDEZ Anthony A.J., A generic model of hierarchy for systems analysis and simulation, *Agricultural systems*, Vol. 57, N° 2, pp. 197-225, 1998

CAPRIHAN Rahul, WADHWA Subhash, Impact of routing flexibility on the performance of an FMS – A simulation study, *The International Journal of Flexible Manufacturing Systems*, 9, pp. 273-298, 1997

CARRE-MENETRIER Véronique, NDJAB HAGBEBELL Constant, ZAYTOON Janan, Methods and tools for the synthesis of an optimal control implementation for Grafcet, *APII – Journal Européen des Systèmes Automatisés*, Vol. 33, N° 8-9, pp. 1073-1092, 1999

CARRE-MENETRIER Véronique, ZAYTOON Janan, Formal composition algorithm for the synthesis of a correct controller implementation, 10th IFAC/INCOM'01 symposium, Vienna, Austria, 2001

CASSANDRAS C.G., LAFORTUNE S., *Introduction to discrete event systems*. Kluwer Academic. ISBN 0-7923-8609-4, 1999

CHAFIK S., Proposition d'une structure de contrôle par supervision hiérarchique et distribuée : application à la coordination, Thèse de Doctorat de l'Institut National des Sciences Appliquées de Lyon, 2000

CHAFIK Samir, NIEL Eric, Du contrôle par supervision hiérarchique distribuée à la coordination hiérarchique, Première Conférence Internationale Francophone d'Automatique, CIFA 2000, Ecole Centrale de Lille, 5-8 juillet 2000

CHAFIK S., NIEL E., Hierarchical-decentralized solutions of supervisory control. 3th International Symposium on Mathematical Modelling, MATHMOD, Vienna, Austria, 2000

CHANDRA V, KUMAR R., A new modelling formalism and automata model generator for a class of discrete event systems, Proceedings of the American Control Conference, pp 4562-4567, Arlington, VA, 25-27 Juin 2001

CHANDRA V. KUMAR R., A discrete event systems modelling formalism based on event occurrence rules and precedence, *IEEE Transactions on Robotics and Automation*, Vol. 17, N°6, 2001

CHANDRA V, MOHANTY S.R., KUMAR R., Automated control synthesis for an assembly line using discrete event control systems theory, Proceedings of the American Control Conference, pp 4956-4961, Arlington, VA, 25-27 Juin 2001

CHARBONNIER F., Commande supervisée des Systèmes à Evénements Discrets, Thèse de doctorat de l'Institut National Polytechnique de Grenoble, Spécialité : Automatique - Productique, 10 Janvier 1996

CHARBONNIER F., ALLA H., DAVID R., The supervised control of discrete event systems. *IEEE Transactions on Control Systems Technology*, 7, 2, 1999

CHARPENTIER Patrick, MUHL Emmanuel, From a reactive, heterarchical to a holonic system : an application for optimising flow in an automotive plant. *Production Planning & Control*, vol. 15, n°2, pp. 166-177, ISSN 1366-5871, mars 2004

CHAXEL Frédéric, Contribution à la gestion et à la conduite des systèmes manufacturiers par objets nomades de production, Thèse de Doctorat de l'Université Henri Poincaré Nancy 1, 1995

CHAXEL F., CHARPENTIER P., JACQUEL D., Product agent concept based on feature modelling and JavaCard implementation, International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 3, pp. 208-214, 2003

CHEN Hoaxun, HANISCH Hans-Michael, Control synthesis of timed discrete event systems: part one and two, 14th Triennial IFAC World Congress, Beijing, P. R. China, 1999

CHEN Hoaxun, HANISCH Hans-Michael, Model aggregation for hierarchical control synthesis of discrete event systems, 39th IEEE Conference on Decision and Control, CDC 2000, Sydney Convention & Exhibition Center, Decembre 2000

CHEN Yi-Liang, LAFORTUNE Stéphane, LIN Feng, How to reuse supervisors when discrete event system models evolve, Proceedings of the 36th Conference on Decision and Control, San Diego, California, USA, Décembre 1997

CHEN Yi-Liang, LAFORTUNE Stéphane, LIN Feng, Incremental model evolution and reusability of supervisors for discrete event systems, *Automatica*, 36, pp. 243-259, 2000

CHEN Yi-Lang, LIN Feng, Hierarchical modelling and abstraction of discrete event systems using finite state machines with parameters, Proceeding of the 40th Conference on Decision and Control, Orlando, Floride, USA, Décembre 2001

CHENG Fan-Tien, CHANG Chih-Feng, WU Shang-Lun, Development of holonic manufacturing execution systems, *Journal of Intelligent Manufacturing Systems*, 15, 253-267, 2004

CHIRN Jin-Lung, MCFARLANE Duncan C., Application of the holonic component-based approach to the control of a robot assembly cell, Proceeding of IEEE Conference on Robotics and Automation, San Francisco, Avril 2000

CHIRN Jin-Lung, MCFARLANE Duncan C., A holonic component-based approach to reconfigurable manufacturing control architecture, Proceeding of HoloMAS'00, First International Workshop on Industrial Applications of Holonic and Multi-agent Systems, Londres, 6-8 Septembre 2000

CHRISTENSEN Jim, THOUATI Michel, ODO Struger, Les systèmes holoniques, *CiMax : Edition Terrain*, N° 7, pp 26-31, Janvier-Février 1996

COMBACAU Michel, Surveillance hiérarchisée des systèmes complexes, Habilitation à diriger des recherches, Université Paul Sabatier, Toulouse, 7 juillet 1998.

CRAYE Etienne, Contribution au contrôle/commande de systèmes flexibles de production manufacturière, Habilitation à diriger des recherches de l'Université des Sciences et Technologies de Lille, 7 décembre 1994

CRUETTE Didier, Méthodologie de conception des systèmes complexes à événements discrets : application à la conception et à la validation hiérarchisée de la commande de cellules de production flexibles dans l'industrie manufacturière, Thèse de Doctorat de l'Université de Lille 1, 1991

DA CUNHA Antonio E. C., CURY José E. R., KROGH Bruce H., An assume-guarantee reasoning for hierarchical coordination of discrete even systems, Proceedings of 6th International Workshop on Discrete Event Systems, WODES'02, Saragoza, Espagne, 2-4 octobre 2002

DA SILVEIRA Giovani, BORENSTEIN Denis, FOGLIATTO Flávio S. Mass customization: literature review and research directions, *International Journal of Production Economics*, 72, pp. 1-13, 2001

DAVIS Stanley, *Future perfect*, Addison-Wesley, ASIN 0-201-11513-1, 1987

DEEN, S.M. (Editeur), *Agent-Based Manufacturing - Advances in the Holonic Approach*. Springer ISBN 3-540-44069-0, 2003

DE QUEIROZ M.H., CURY J.E.R., Synthesis and implementation of local modular supervisory control for a manufacturing cell. Proceedings of the 6th International Workshop on Discrete Event Systems, 2-4 October, Zaragoza, Espagne, pp. 377-382, 2002

DESPRES F. M., *Automatisation des systèmes de production : du besoin à l'utilisation*, Editions Kirk, ISBN 2-905-68623-5, 1991

DIETRICH P., MALIK R., WONHAM W.M., BRANDIN B.A., Implementation considerations in supervisory control, Symposium on Supervisory control of DES, SCODES 2001, dans *Synthesis and Control of DES*, pp. 185-201, Kluwer, 2001

EL KHATTABI Samir, Intégration de la surveillance de bas niveau dans la conception des systèmes à événements discrets : application aux systèmes de production flexibles. Thèse de l'Université de Sciences et Technologie de Lille, 29 septembre 1993

FABIAN M., LENNARTSON B., Petri nets and control synthesis: an objet-oriented approach, IMS 94, Vienne, Autriche, Juin 1994

FABIAN M., LENNARTSON B., Applying supervisory control theory to discrete event systems modeled by object oriented principles, EFTA'95, Paris, Octobre 1995

FABIAN M., On object Oriented Non-Deterministic Supervisory Control, Ph. D. Thesis, Chalmers University of Technology, Sweden, Technical report 282, Decembre 1995

FABIAN M., LENNARTSON B., On non-deterministic supervisory control, IEEE Conference on Decison and Control, CDC'96, Kobe, Japon, 1995

FABIAN M., HELLGREN A., PLC-based Implementation of Supervisory Control for Discrete Event Systems. 37th IEEE Conference on Decision and Control, Tampa, Florida, 1998

FABIAN M., KUMAR R., Mutually nonblocking supervisory control of discrete event systems, *Automatica*, 36, pp. 1863-1869, 2000

FARRELL Ronald S., SIMPSON Timothy W., Product platform design to improve commonality in custom products, *Journal of Intelligent Manufacturing*, 14, pp. 541-556, 2003

FAURE Robert, LEMAIRE Bernard, PICOULEAU Christophe, *Précis de recherche opérationnelle : méthodes et exercices, 5° édition*, ISBN 2100046918, 2000

FERBER J., *Les systèmes multi-agents, vers une intelligence collective*. InterEditions, Paris, ISBN 2-7296-0665-3

FISCHER Klaus, Agent-based design of holonic manufacturing systems, *Robotics and autonomous systems*, 27, pp. 3-13, 1999

FLETCHER M., GARCIA-HERREROS E., CHRISTENSEN J.H., DEEN S.M., MITTMANN R., An open architecture for holonic cooperation and autonomy, 11th International Workshop on Database and Expert Systems Aaplication (DEXA'00), Greenwich, London, UK, 6-8 septembre 2000

FLETCHER Martyn, DEEN S. Misbah, Fault-tolerant holonic manufacturing systems, *Concurrency and computation : practice and experience*, 13, pp . 43-70, 2001

FLETCHER M., BRENNAN R.W., NORRIE D.H., Modeling and reconfiguring intelligent holonic manufacturing systems with Internet-based mobile agents, *Journal of Intelligent Manufacturing*, 14, pp. 7-23, 2003

FLORDAL H., FABIAN M., AKESSON K., HELLGREN A., Controllability revisited: a generalization for the modular approach, 11th IFAC Symposium on Information Control Problems in Manufacturing, Salvador-Bahia, Brésil, 5-7 avril 2004

FUSAOKA A., SEKI H., TAKAHASHI K., A description and reasoning of plant controllers in temporal logic. Proceedings of the 8th International Joint Conference on Artificial Intelligence, Karlsruhe, Germany, 1983

GALARA Dominique, HENNEBICQ Jean Pierre, Process control engineering trends, 9th Symposium on Information Control in Manufacturing, INCOM'98, Advances in Industrial Engineering, Nancy, 24-26 Juin 1998

GARCIA Andrés, MCFARLANE Duncan, THRONE Alan, FLETCHER Martin, The impact of Auto-ID technology in materials handling systems, IMS'2003, 7th IFAC Workshop on Intelligent Maunfacturing Systems, ISBN 0-08-043862-8, 2003

GAUDIN Benoit, MARCHAND Hervé, Contrôle de systèmes à événements discrets hiérarchiques, 4eme Colloque Francophone sur la Modélisation des Systèmes Réactifs, MSR'03, Metz, du 6 au 8 Octobre 2003

GHAFFARI A., REZG N., XIE X., Conception du superviseur optimal vivant à l'aide de la théorie des régions, Modélisation des Systèmes Réactifs MSR'2001, Toulouse, 17-19 octobre 2001

GHAFFARI Asma, REZG Nidhal, XIE Xiaolan, Algebraic and geometric characterization of Petri net controllers using the theory of regions, Proceedings of 6th International Workshop on Discrete Event Systems, WODES'02, Saragoza, Espagne, 2-4 octobre 2002

GLANZER Klaus, SCHMIDT Thomas, WIPPEL Gerald, DUTZEL Christoph, Integration of shop floor holons with automated business processes, HOLOMAS'03, 1st International Conference on Application of Holonic and Multi-agent Systems, 1-3 septembre 2003

GODON Alain, Contribution à la commande des systèmes à événements discrets par réseaux de Petri, Thèse de doctorat de l'université d'Angers mention Sciences de l'Ingénieur, 28 Novembre 1996

GODON A., FERRIER, J. L., DES control design using petri nets, European Control Conference, ECC'97, Bruxelles, 1-4 juillet 1997

GOHARI P., A linguistic framework for controlled hierarchical DES, Thesis submitted in conformity with the requirements for the degree of Master of Applied Science, University of Toronto, Canada, 1998

GOHARI P., WONHAM, W.M., A linguistic framework for controlled hierarchical DES. Proceedings of the 4th IEEE Workshop On Discrete Event Systems, WODES 98, Calgary, 1998

GOHARI Peyman, WONHAM, W.M., On the complexity of supervisory control design in the RW framework, *IEEE Transaction on Systems, Man and Cybernetics, special issue on DES*, 2000

GOU Ling, LUH Peter B., KYOKA Yuji, Holonic manufacturing scheduling: architecture, cooperation mechanism, and implementation, *Computers in Industry*, 37, pp. 213-231, 1998

GOUIN A., LIBEAUT L., FERRIER J.-L., Supervisory control of timed automata, European Control Conference, ECC'97, 1997

GOUIN Alexia, FERRIER Jean-Louis, Modeling and supervisory control of timed automata, *APII – Journal Européen de Systèmes Auomatisés*, Vol. 33, N° 8-9, 1999

GOUIN Alexia, Contribution à la commande des systèmes à événements discrets temporisés : synthèse de superviseur dans le cadre automate, Thèse de doctorat de l'université d'Angers, mention Automatique et Informatique Appliquée, 3 Décembre 1999

**GOUYON David**, GOUIN Alexia, PÉTIN Jean-François, Application de techniques de synthèse en ingénierie d'automatisation. CIFA 2002, Conférence Internationale Francophone d'Automatique, Nantes, 8 au 10 juillet 2002

**GOUYON David**, GOUIN Alexia, PÉTIN Jean-François, Application de techniques de synthèse en ingénierie d'automatisation. *SEE Sciences et Technologies de l'Automatique*, vol. 0, www.e-sta.see.asso.fr, novembre 2003

**GOUYON David**, PÉTIN Jean-François, GOUIN Alexia, Modèles du procédé et de ses spécifications pour la synthèse de la commande. 4eme Colloque Francophone sur la Modélisation des Systèmes Réactifs, MSR'03, Metz, du 6 au 8 Octobre 2003

**GOUYON David**, PÉTIN Jean-François, GOUIN Alexia, Pragmatic approach for modular control synthesis and implementation. *International Journal of Production Research*, vol. 42, n° 14, pp. 2839-2858, ISSN 0020-7543, Jul 2004

**GOUYON David**, SIMÃO Jean-Marcelo., ALKASSEM Khaled, MOREL Gérard, Product-Driven Automation Issues For B2m-Control Systems Integration. INCOM 2004 , International Conference on Information Control Problems, Salvador-Bahia, Brazil, Avril 4-7 2004

**GOUYON David**, PÉTIN Jean-François, MOREL Gérard, Control Synthesis For Product-Driven Automation. IFAC WODES'04, 7th Workshop on Discrete Event Systems, Reims, 22-24 septembre 2004

HANISCH H.-M., THIEME J., LUDER A., Towards a synthesis method for distributed safety controllers based on net condition/event systems, *Journal of Intelligent Manufacturing*, 8, pp. 357-368, 1997

HELLGREN A., Modelling and implementation aspects of supervisory control, thesis for the degree of licenciate of engineering, Chalmers University of Technology, Göteborg, Sweden, technical report n° 350l, 2000

HELLGREN Anders, FABIAN Martin, LENNARTSON Bengt, On the execution of discrete event systems as sequential function charts, Proceedings of the 2001 IEEE Conference on Control Application, Septembre 2001

HELLGREN Andersn LENNARTSON Bengt, FABIAN Martin, Modelling and PLC-based implementation of modular supervisory control, Proceedings of 6th International Workshop on Discrete Event Systems, WODES'02, Saragoza, Espagne, 2-4 octobre 2002

HENRY Sébastien, ZAMAI Eric, JACOMINO Mireille, Real time reconfiguration of manufacturing systems, IEEE Conference on Systems, Man and Cybernetics, The Hague, Netherlands, 10-13 octobre 2004

HERMANS Kris, BERBERS Yolande, ROBBEN Bert, WYNS Jo, VAN BRUSSEL Hendrik, A software framework for shop floor control systems using active objects, Proceedings of 2nd International Workshop on Intelligent Manufacturing Systems, pp. 137-145, Louvain, Belgique, 1999

HEYMANN Michael, LIN Feng, MEYER George, Synthesis and viability of minimally interventive legal controllers for hybrid systems, *Discrete Event Dynamic Systems: Theory and Application*, 8, pp 105-135, 1998

HIRAISHI K, Synthesis of supervisors using learning algorithm of regular languages, *Discrete Event Dynamic Systems: Theory and Applications*, 11, pp 211-234, 2001

HOLLOCKS B.W., GORANSON H.T., SHORTER D.N., VERNANDAT F.B., Assessing Enterprise Integration for Competitive Advantage – Workshop – 2, Working Group 1, dans *Enterprise Engineering and Integration : Building International Consensus* (eds. Kosanke K., Nells J.G.), Proceeding of ICEIMT'97, International conference on Enterprise Modelling and Modelling Technology, pp. 96-107, Springer-Verlag, Berlin, ISBN 3-540-63402-9, 1997

HOLLOWAY L. E., KROGH B. H., GIUA A., A survey of Petri net methods for controlled discrete even systems, *Discrete event dynamic systems: Theory and application*, 7, pp. 151-190, 1997

HUANG Biqing, GOU Hongmei, LIU Wenhuang, LI Yu, XIE Min, A framework for virtual enterprise control with the holonic manufacturing paradigm, *Computers in Industry*, 49, pp. 299-310, 2002

International Electrotechnical Commission: *Preparation of Function Charts for Control Systems*, IEC 60848, Genève, 1988

International Electrotechnical Commission: *Programmable controllers, Part3 – Programming languages*, IEC 61131-3, Genève, 1993

International Electrotechnical Commission: *Function blocks, Part 1 – Architecture*, IEC PAS 61499-1, Genève, 2000

International Electrotechnical Commission: *Function blocks, Part 2 – Software tool requirements*, IEC PAS 61499-2, Genève, 2001

ISO WD 15704 Requirements for enterprise-reference architectures and methodologies. ISO working draft, ISO TC184/SC5/WG1, Theodore J. Williams (ed.). Annexe A GERAM : Generalised Enterprise

Reference Architecture and Methodology. IFIP-IFAC task force on architectures for enterprises integration, Juin 1998

JIANG Shengbing, KUMAR Ratnesh, Supervisory control of non deterministic discrete event systems via masked prioritized synchronization, Proceeding of the 38th Conference on Decision and Control, Phoenix, Arizona, pp. 2212-2217, 1999

JIANG S., KUMAR R., Decentralized control of discrete event systems with specializations to local control and concurrent systems. *IEEE Transactions on Systems, Man and Cybernetics, part B*, 30, 5, pp. 653-660, 2000

JIANG S., CHANDRA V., KUMAR R., Decentralized control of discrete-event systems with multiple local specifications, Proceedings of 2001 American Control Conference, Alexandria, VA, June 2001

JIAO Jianxin, MA Qinhai, TSENG Mitchell M., Towards high value-added products and services : mass customization and beyond, *Technovation*, 23, pp. 809-821, 2003

JOHNSON Timothy L., Improving automation software dependability: a role for formal methods? INCOM 2004, International Conference on Information Control Problems, Salvador-Bahia, Brazil, April 4-7 2004

KADAR B., MONOSTORI L., Adaptative agents in distributed manufacturing systems, INCOM 2001, 10th IFAC Symposium on Information Control Problems in Manufacturing, Vienne, Autriche, 20-22 septembre 2001

KARKKAINEN Mikko, HOLMSTROM Jan, FRAMLING Kary, ARTTO Karlos, Intelligent products – a step towards a more effective project delivery chain, *Computers in Industry*, 50, pp. 141-151, 2003

KHATAB A., NIEL E., State feedback stabilizing controller for the failure recovery of timed discrete event systems, Proceedings of 6th International Workshop on Discrete Event Systems, WODES'02, Saragoza, Espagne, 2-4 octobre 2002

KLEIN Thomas, Contribution à la reconfiguration dynamique des systèmes de commande, Mémoire de DEA Production Automatisée, Université Henri Poincaré – Nancy 1, Juillet 2004

KOESTLER Arthur, *The ghost in the machine*, ISBN 0-14-019162-5, 1967

KOMENDA Jan, Computation of supremal sublanguages of supervisory control using coalgebra, Proceedings of 6th International Workshop on Discrete Event Systems, WODES'02, Saragoza, Espagne, 2-4 octobre 2002

KOSANKE Kurt, CIMOSA – Overview and status, *Computer in Industry*, 27, pp.101-109, 1995

KOSECKA Jana, Supervisory control theory for autonomous mobile agents, Dissertation proposal presented to the Faculties of the University of Pennsylvania in Partial Fulfilment of the Requirements for the Degree of Doctor of Phylosophy, 1995

KOTLER P., From mass marketing to mass customization. *Planning review*, 17, pp. 10-13, 1989

KUMAR R., GARG V., MARCUS S.L., On controllability and normality of discrete event dynamical systems. S*ystems & Control Letters*, 17, pp. 157-168, 1991

KUMAR Ratnesh, GARG Vijay K., Extremal solution of inequations over lattices with application to supervisory control, *Theoretical Computer Science*, 148, pp. 67-92, 1995

KUMAR R., GARG V., *Modeling and control of logical discrete event systems*, Kluwer Academic. ISBN 0-7923-9538-7, 1995

KUMAR Ratnesh, SHAYMANN Mark A., Nonblocking supervisory control of nondeterministic systems via prioritized synchronization, *IEEE Transaction on Automatic Control*, Vol. 41, N° 38, 1996

KUMAR Ratnesh, SHAYMANN Mark A., Centralized and decentralized supervisory control of nondeterministic systems under partial observation, *SIAM Journal of Control and Optimization*, 1997

LAMBOLEY Patrick, Proposition d'une méthode formelle d'automatisation de systèmes de production à l'aide de la méthode B, Thèse de doctorat de l'université de Nancy 1, 2001

LANGER Gilad, SØRENSEN Christian, LARSEN Michael Holm, Product state models in holonis shop floor control systems, Proceedings of 2nd International Workshop on Intelligent Manufacturing Systems, pp. 23-32, Louvain, Belgique, 1999

LAUZON S.C., MILLS J.K., BENHABIB B., An implementation methodology for the supervisory control of flexible manufacturing workcells. *SME, Journal of Manufacturing Systems*, vol. 16, n°1, 1997

LAYNE Scott P., BEUGELSDIJK Tony J., Mass customized testing and manufacturing via the Internet, *Robotics and Computer-Integrated Manufacturing*, 14, pp. 377-387, 1998

LE GALLOU F., BOUCHON-MEUNIER B., *Systémique – Théorie et applications*, ISBN 2-85206-784-6, Lavoisier, 1992

LEDUC R.J., BRANDIN B.A., WONHAM W.M., Hierarchical interface-based non-blocking verification, Proceedings of Candian Conference on Electrical and Computer Engineering, pp. 1-6, 7 mai 2000

LEDUC R.J., Hierarchical Interface-based Supervisory Control. Doctoral Thesis, Dept. of Elec. & Comp. Engrg., University of Toronto, 2002

LEGER Jean-Baptiste, Contribution méthodologique à la maintenance prévisionnelle des systèmes industriels de production : proposition d'un cadre formel de modélisation. Thèse de l'Université Henri Poincaré – Nancy 1, 23 avril 1999

LEITAO Paulo, COLOMBO Armando W, RESTIVO Francisco, An Approach to the Formal Specification of Holonic Control Systems, 1st International Conference on Industrial Application of Holonic and Multi-Agent Systems, HOLOMAS'03, Prague, République Tchèque, *LNAI*, Vol. 2744, Septembre 2003

LEITAO Paulo, RESTIVO Francisco, Identification of ADACOR holons for manufacturing control, IMS'2003, 7th IFAC Workshop on Intelligent Maunfacturing Systems, ISBN 0-08-043862-8, 2003

LENNARTSON B., FABIAN M., TITTUS M., HELLGREN A., Modeling primitives for supervisory control. Proceedings of the 4th WODES, Cagliari, Italy, 1998

LENNARTSON B., TITTUS M., FABIAN M., HELLGREN A., ANDREASSON S.-A., Specification structures for supervisory control. Proceedings of the 4th WODES, Cagliari, Italy, 1998

LEWIS Robert, *Modelling control systems using IEC 61499 – Applying function blocks to distributed systems*, IEE Control Engineering Series 59, ISBN 0-85296-796-9, 2001

LHOSTE Pascal, Contribution au Génie Automatique : concepts, modèles, méthodes et outils pour le Génie Automatique, Habilitation à Diriger des Recherches présentée à l'université de Nancy I, 10 Février 1994

LHOSTE Pascal, MOREL Gérard, From discrete event behavioural modelling to intelligent actuation and measurement modelling, ASI'96, Life Cycle Approaches to Production Systems. Management, Control, Supervisor. The annual conference of the ICIMS-NOE, Toulouse, 2-6 juin 1996

LHOTE F., CHAZELET Ph., DULMET M., The extension of principles of cybernetics towards engineering and manufacturing, *Annual Reviews in Control*, 23, pp. 139-148, 1999

LIN F., VAZ A. F., WONHAM, W. M., Supervisory specification and synthesis for discrete event systems, Int. J. Control, Vol. 48, N°1, pp. 321-332, 1988

LIN F., WONHAM W. M., Decentralized supervisory control of discrete-event systems, *Information Sciences*, 44, pp. 199-224, 1988

LIN Feng, WONHAM W. Murray, Decentralized control and coordination of discrete-event systems with partial observation, *IEEE Transactions on Automatic Control*, Vol. 35, N° 12, décembre 1990

LIN F., Analysis and synthesis of discrete event systems using temporal logic, *Control-theory and Advanced Technology*, Vol. 9, N° 1, pp. 341-350, 1993

LIU Jing, DARABI Houshang, Ladder logic implementation of Ramadge-Wonham supervisory controller, Proceedings of 6th International Workshop on Discrete Event Systems, WODES'02, Saragoza, Espagne, 2-4 octobre 2002

MARCHAND H., BOURNAI P., LEBORGNE M., LE GUERNIC P., A design environment for discrete-event controllers based on the signal language, IEEE International conference on systems, man and cybernetics, San Diego, USA, 11-14 octobre 1998.

MARCHAND Hervé, BOURNAI Patricia, LE BORGNE Michel, LE GUERNIC Paul, Synthesis of discrete-event controllers based on the Signal environment, *Discrete Event Dynamic Systems: Theory and Applications*, 10, pp. 325-346, 2000

MARIK Vladimir, Industrial applications of the agent-based technology, INCOM 2004 , International Conference on Information Control Problems, Salvador-Bahia, Brazil, Avril 4-7 2004

MARIKAR M.T., ROTSEIN G.E., MACCHIETTO S., An integrated environment for the design of procedural controllers, Preprints Volume II, 9th Symposium on Information Control Manufacturing, Advances in Industrial Engineering, INCOM'98, Nancy, 1998

MATTHEWS John, Organisational foundations of intelligent manufacturing systems – the holonic viewpoint, *Computer Integrated Manufacturing Systems*, Vol. 8, N°4, pp. 237-243, 1995

MCFARLANE Duncan, BUSSMANN Stefan, Developments in holonic production planning and control, *International Journal of Production Plannig and Control*, Vol. 11, N° 6, pp. 522-536, 2000

MCFARLANE Duncan, SARMA Sanjay, CHIRN Jin Lung, ASHTON Kevin, The intelligent product in manufacturing control and management, 15th Triennal IFAC World Congress, Barcelone, Espagne, 2002

MCFARLANE Duncan, Product identity and its impact on discrete event observability, ECC'03, European Control Conference, University of Cambridge, UK, 1-4 septembre 2003

MOOR Thomas, DAROVEN J.M., RAISCH Jörg, Strategic refinements in abstraction based supervisory control of hybrid systems, Proceedings of 6th International Workshop on Discrete Event Systems, WODES'02, Saragoza, Espagne, 2-4 octobre 2002

MOREL David, Contribution à la simulation de parties opératives interopérables pour la validation d'automatismes distribués, Diplôme de Recherche Technologique, Option Automatique, Université Henri Poincaré – Nancy 1, 1999

MOREL G., IUNG B., GALARA D., RUSSO F., Prototyping a sub-concept of computer integrated manufacturing and engineering (CIME): the integrated control maintenance and technical management system (CMMS). 1st World Automation Congress, *TSi Press Series on Intelligent Automation and Soft Computing: Trends in research, development and applications*, vol. 2, pp. 25-30, 14-17 août 1994, Maui, USA, ISBN 0-9627451-5-4, 1994.

MOREL G., PETIN J-F., LAMBOLEY P. Formal specification for manufacturing systems automation. IFAC - INCOM'01 Conference on Information Control problems in Manufacturing, Vienna, Austria, September 20-22, 2001.

MOREL Gérard, GRABOT Bernard (Editeurs), Intelligent Manufacturing, Engineering Application of Artificial Intelligence, Vol. 16, Issue 4, Pages 271-393, Juin 2003

MOREL Gérard, MERY Dominique, LEGER Jean-Baptiste, LECOMTE Thierry, Proof-oriented fault-tolerant engineering: rationales, experiments and open issues, Proceedings of the 7th IFAC Symposium on Cost Oriented Automation, Gatineau/Ottawa, Canada, 7-9 juin 2004.

MUNERATO Francis, Robotisation Intégrée d'un Ilot de Production Manufacturière : aspect contrôle-commande et communication, Thèse de doctorat de l'université de Nancy 1, 18 avril 1988

MUSIC Gašper, MATKO Drago, ZUPANCIC Borut, Model based programmable control logic design, 15th Triennal IFAC World Congress, Barcelona, Spain, 2002

NDJAB C., ZAYTOON J., Synthèse en ligne de la commande à partir du Grafcet, Actes du Congrès MSR'99, Modélisation des Systèmes Réactifs, pp. 341-350, Cachan, 24-25 mars 1999

NDJAB C., Synthèse de la commande des systèmes à événements discrets par Grafcet, Thèse de doctorat de l'université de Reims Champagne Ardenne, spécialité Génie Informatique, Automatique et Traitement du Signal, 16 Septembre 1999

NEUNREUTHER Eric, Contribution à la modélisation des Systèmes Intégrés de Poduction à Intelligence Distribuée : application à la distribution du contrôle-commande et à la gestion technique sur les équipements de terrain, Doctorat de l'Université Henri Poincaré – Nancy 1, 19 octobre 1998

NEWMAN Wyatt S., PODGURSKI Andy, QUINN Roger D., MERAT Frank L., BRANICKY Michael S., BARENDT Nick A., CAUSEY Greg C., HAASER Erin L., KIM Yoohwan, SWAMINATHAN Jayendran, VELASCO Virgilio B., Design lessons for building agile manufacturing systems, *IEEE Transactions on Robotics and Automation*, Vol. 16, N° 3, 2000

NIEL E., PIETRAC L., REGIMBAL L., Advantages and drawbacks of the logic programm synthesis using supervisory control theory.10th IFAC/INCOM'01 Symposium, Vienna, Austria, 2001

NOURELFATH M., NIEL E., Modular supervisor control of an experimental automated manufacturing system, *Control Engineering Practice*, 12, pp. 205-216, 2004

OLIVEIRA Eugénio, FISCHER Klaus, STEPANKOVA Olga, Multi-agent systems: which research for which applications, *Robotics and autonomous systems*, 27, pp. 91-106, 1999

OU Yeong-Chang, HU Jwu-Sheng, A modified method for supervisor specification and synthesis of a class of discrete event systems, *Asian Journal of Control*, Vol. 2, N° 4, pp. 263-273, 2000

PELISSIER E., NGUYEN L., Traçabilité des produits sanguins labiles : definition, régelementation, bilan et perpectives, *Transfus. Clin. Biol*., 7 Suppl. 1 72-4, 2000

PEREYROL Frédéric, Interaction produit-procédé – Extension de la modélisation de la commande avec suivi automatique du produit, Thèse présentée à l'Université Montpellier II, 24 Septembre 1993

PETIN Jean-François, IUNG Benoit, MOREL Gérard, Distributed intelligent actuation and measurement (IAM) system within an integrated shop-floor organisation, *Computers in Industry*, 37, pp. 197-211, 1998

PETIT Pascal, Une révolution déclanchée par une puce, *Logistique magazine*, n° 179, Juillet-Août 2003

PFEIFER Tilo, STOBLEN Peter, Networks as a basis for production-integrated quality management, Computer Integrated Manufacturing, Proceedings of the Seventh CIM-Europe Annual Conference, Turin, Italie, 29-31 Mai 1991

PIETRAC Laurent, CHAFIK Samir, REGIMBAL Luc, Application de la théorie de la supervision : un exemple de conception de programmes d'API, Conférence Internationale Francophone d'Automatique, Nantes, 8-10 Juillet 2002

PILLER Frank T., REICHWALD Ralf & TSENG Mitchell, Proceedings of the MCPC 2003: Competitive Advantage Through Customer Interaction: Leading Mass Customization and Personalization (MCP) from the Emerging State to a Mainstream Business Model, Munich, Octobre 2003

QIU R., WYSK R., XU Q., Extended structured adaptive supervisory control of shop-floor controls for an e-manufacturing system. *International Journal of Production Research*, Vol.41, N° 8, pp. 1605-1620, 2003

QUINN Roger D., CAUSEY Greg C., MERAT Frank L., SARGENT David M., BARENDT Nick A., NEWMAN Wyatt S., VELASCO Virgilio B. Jr., PODGURSKI Andy, JO Ju-Yeon, STERLING Leon S., KIM Yoohwan, An agile manufacturing workcell design, *IIE Transactions*, 29, pp. 901-909, 1997

RAMADGE P.J., WONHAM W.M., Supervisory control of a class of discrete event processes. *SIAM Journal of Control and Optimization*, vol. 25, n°1, 1987

RAMIREZ-SERRANO A., BENHABIB B., Supervisory control of reconfigurable flexible-manufacturing workcells – temporary addition of resources, *International Journal of Computer Integrated Manufacturing*, Vol. 16, N0 2, pp. 93-111, 2003

RANKY P., *Computer Integrated Manufacturing: an introduction with case studies*. Prentice-Hall, Englewood Cliffs, NJ, ASIN : 0131656554 1986.

RANNANJARVI Leila, HEIKKILA Tapio, Software development for holonic manufacturing systems, *Computer in Industry* 37, pp. 233-253, 1998

ROMANOVSKI I., CAINES P.E., Specification and supervisory control for multi-agent product systems, 15th IFAC World Congress, Barcelone, Espagne, 2002

RONDEAU E., DIVOUX T., LEPAGE F., VERON M., MMS virtual manufacturing devices generation : the Paris subway example, *Integrated Manufacturing Systems Engineering, Part three : Enterprise Engineering*, P. Ladet, F.B. Vernadat (edts.), Chapman & Hall on Behalf of the International Federation for Information Processing IFIP TC5, ISBN 0-412-72680-7, pp. 84-98, octobre 1995

ROUSSEL J.M., FAURE J.M., Synthèse de la commande d'un système logique à partir d'une expression logique de ses spécifications, Modélisation des Systèmes Réactifs, MSR'2003, Metz, 6-8 octobre 2003

ROUSSEL J.M., FAURE J.M., LESAGE J.J., MEDINA A., 2004, An algebraic approach for dependable logic control systems design, *International Journal of Production Research*, vol. 42, N° 14, pp. 2859-2876, 2004

SAKAROVITCH Jacques, *Eléments de la théorie des automates*, Vuibert, ISBN 2-7117-4807-3, 2003

SANCHEZ A., MACCHIETO S., Design of procedural controllers for chemical processes, *Computers Chem. Engng*. 19, pp. S381-S386, 1995

SEEBOLD Patrice, *Théorie des automates*, Vuibert, ISBN 2-7117-8630-7, 1999

SFALCIN Alain, Contribution d'une approche semiotique à la réutilisation des composants de commande des machines et systèmes automatisés de production, Thèse de doctorat de l'université de Nancy I, Spécialité Production Automatisée, 22 Mai 1992

SHAYMAN M. A. & KUMAR R., A New Framework for Supervisory Control of Discrete Event Systems, Technical Research Report 95-72, Institute for Systems Research, 1995

SHAYMAN M. A. & KUMAR R., Supervisory control of nondeterministic systems with driven events via prioritized synchronization and trajectory models, *SIAM Journal on Control and Optimization*, pp. 469-497, Mars 1995

SHIN Junho, CHO Hyunbo, Planning and sequencing heuristics for feature based control of holonic machining equipement, *The International Journal of Flexible Manufacturing Systems*, 13, pp. 49-70, 2001

SORMAZ Dusan N., KHOSHNEVIS Behrokh, Generation of alternative plans in integrated manufacturing systems, *Journal of Intelligent Manufacturing*, 14, pp. 509-526, 2003

SOUSA Paulo, RAMOS Carlos, A dynamic scheduling holon for manufacturing orders, *Journal of Intelligent Manufacturing*, 9, pp. 107-112, 1998

SOUSA Paulo, RAMOS Carlos, A distributed architecture and negociation protocol for scheduling in manufacturing systems, *Computer in Industry* 38, pp. 103-113, 1999

SREENIVAS Ramavarapu S., On the existence of finite state supervisors for arbitrary supervisory control problems, *IEEE Transactions on Automatic Control*, Vol. 42, N° 7., pp. 928-945, Juillet 1997

SREENIVAS Ramavarapu S., On minimal representations of Petri nets langages, Proceedings of 6th International Workshop on Discrete Event Systems, WODES'02, Saragoza, Espagne, 2-4 octobre 2002

SU R., WONHAM W.M., Supervisor Reduction for Discrete-Event Systems, *Discrete Event Dynamic Systems*, Vol. 14, n°1, pp. 31-53, Janvier 2004

TAKAI Shigemasa, Robust supervisory control of a class of timed discrete event systems under partial observation, *Systems & Control Letters*, 39, pp. 267-273, 2000

TAKAI Shimegasa, USHIO Toshimitsu, A modified normality condition for decentralized supervisory control of discrete event systems, Proceedings of the American Control Conference, Arlington, VA, 25-27 Juin 2001

TAKAI Shimegasa, USHIO Toshimitsu, Reliable decentralized supervisory control for marked language specification, *Asian Journal of Control*, Vol. 5, N° 1, pp. 160-167, 2003

THISTLE J.G., Supervisory control of discrete event systems, *Mathl. Comput. Modelling*, Vol. 23, N° 11/12, pp. 25-53, 1996

TOGUYENI Abdoul K. Armand, Reconfigurability analyser for automated production system, INCOM 2004 , International Conference on Information Control Problems, Salvador-Bahia, Brazil, April 4-7 2004

TRIPAKIS Stavros, Decentralized control of discrete event systems with bounded un un bounded delay communication, Proceedings of 6th International Workshop on Discrete Event Systems, WODES'02, Saragoza, Espagne, 2-4 octobre 2002

TSUBONE Hitoshi, HORIKAWA Mitsuyoshi, A comparison between machine flexibility and routing flexibility, *The International Journal of Flexible Manufacturing Systems*, 11, pp. 83-101, 1999

ULIERU Mihaela, BRENNAN Robert W., WALKER Scott S., The Holonic enterprise: a model for Internet-enabled global manufacturing supply chain and workflow management, *Integrated Manufacturing Systems*, 13/8, pp. 538-550, ISSN 0957-6061, 2002

VALCKENAERS Paul, VAN BRUSSEL Hendrik, WYNS Jo, BONGAERTS Luc, PEETERS Patrick, Designing of holonic manufacturing systems, *Robotics and Computer-Integrated Manufacturing*, 14, pp. 455-464, 1998

VALCKENAERS Paul (Editeur), Special issue: Holonic Manufacturing Systems, *Computer In Industry*, 46 (3), pp. 233-331, 2001

VAN BRUSSEL Hendrik, WYNS Jo, VALCKENAERS Paul, BONGAERTS Luc, PEETERS Patrick, Reference architecture for holonic manufacturing systems: PROSA, *Computers in Industry*, 37, pp. 255-274, 1998

VOGEL C., *Génie cognitif*, ISBN 2-225-81382-5, Masson, Paris, 1988

VYATKIN Valeriy, HANISCH Hans-Michael, Verification of distributed control systems in intelligent manufacturing, *Journal of Intelligent Manufacturing*, 14, pp. 123-136, 2003

WESTKAMPER Engelbert, Technical intelligence for manufacturing, Proceedings of the Second International Manufacturing Systems, Louvain, Belgique, Septembre 1999

WESTKAMPER Engelbert, RITTER Arno, SCHAEFFER Christoph, Asimov-holonic multi-agent systems for AGVs, Proceedings of 2nd International Workshop on Intelligent Manufacturing Systems, pp. 93-97, Louvain, Belgique, 1999

WONG K.C., WONHAM W.M., Hierarchical control of timed discrete-event systems, *Discrete Event Dynamic Systems*, 6, pp. 275-306, 1996

WONG K.C., WONHAM W.M., Modular control and coordination of discrete-event systems, *Discrete Event Dynamic Systems: Theory and Applications*, 8(3), Octobre 1998

WONHAM W.M., RAMADGE P.J., On the supremal controllable of a given language. *SIAM Journal of Control and Optimization*, vol. 25, n°3, 1987

WONHAM W.M., Supervisory control of discrete-event systems: a tutorial introduction, Tutorial lecture, EAIT 2001

WONHAM W.M., Supervisory control theory: models and methods, ATPN – Workshop on Discrete Event Systems Control, 24th International Conference on Application Theory of Petri Nets, ATPN 2003, Eindhover, The Netherland, pp. 1-14, Juin 2003

WRIGHT P.K., BOURNE D.A., *Manufacturing intelligence*, Addison-Wesley, ISBN 0-201-13576-0, 1988

WYNS Jo, Reference architecture for holonic manufacturing systems – the key to support evolution and reconfiguration, Thèse de l'Université Catholique de Louvain, Mars 1999

XIA Hao, TRONTIS Anastasios, PANG Yan, SPATHOPOULOS Michael P., Supervisory eventuality synthesis, Proceedings of 6th International Workshop on Discrete Event Systems, WODES'02, Saragoza, Espagne, 2-4 octobre 2002

XU Yuefei, BRENNAN Robert W., ZHANG Xiaokun, NORRIE Douglas H., A gentic algorithm-based approach to holon virtual clustering, Proceedings of World Multiconference on Systems, Cubernetics and Informatics (SCI'2000), vol. II, pp. 380-385, Orlando, Floride, 23-26 juillet 2000

YOO Tae-Sic, LAFORTUNE Stéphane, A general architecture for decentralized supervisory control of discrete-event systems, Proceedings of WODES 2000, Discrete Event Systems: Analysis and Control, pp. 111-118, Ghent, Belgique, 21-23 Août 2000

YOO Tae-Sic, LAFORTUNE Stéphane, New results on decentralized supervisor control of discrete-event systems, Proceedings of IEEE Conference on Decision and Control, Sydney, Australie, Décembre 2000

YOO Tae-Sic, LAFORTUNE Stéphane, On the computational complexity of some problems arising in partially-observed discrete-event systems, Proceedings of the American Control Conference, Arlington, VA, 25-27 Juin 2001

YOO T.-S., LAFORTUNE S., A general architecture for decentralized supervisory control of discrete-event systems. *Discrete Event Dynamic Systems: Theory and Applications*, 12, 2002

YOO Tae-Sic, LAFORTUNE Stéphane, Decentralized supervisory control: a new architecture with a dynamic decision fusion rule, Proceedings of 6th International Workshop on Discrete Event Systems, WODES'02, Saragoza, Espagne, 2-4 octobre 2002

ZAYTOON Janan, NDJAB Constant, GELLOT François, VILLERMAIN-LECOLIER, Grafcet et théorie des automates, Modélisation des Systèmes Réactifs, MSR'96, Brest, 28-29 mars 1996

ZAYTOON J., NDJAB C., CARRE-MENETRIER V., On the synthesis of Grafcet using the supervisory control theory, IFAC Conference on Control of Industrial Systems, Belfort, 20-22 Mai 1997

ZAYTOON Janan, NDJAB HAGBEBELL Constant, CARRE-MENETRIER Véronique, Grafcet et graphe d'état : synthèse hors ligne de la commande, *APII-Journal Européen des Systèmes Automatisés*, Vol. 33, N° 7, pp. 783-814, 1999

ZAYTOON J., CARRE-MENETRIER V., Synthesis of a correct control implementation for manufacturing systems. *International Journal of Production Research*, 39, pp. 329-345, 2001

ZELM Martin, VERNADAT François B., KOSANKE Kurt, The CIMOSA business modelling process, *Computer In Industry*, 27, pp. 123-142, 1995

ZHANG Jie, GAO Liang, CHAN Felix T.S., LI Peigen, A holonic architecture of the concurrent integrated process planning system, *Journal of Material Processing Technology*, 6766, pp. 1-6, 2003

ZHANG Xiakun, NORRIE Douglas H., Holonic control at the production and controller levels, Proceedings of 2nd International Workshop on Intelligent Manufacturing Systems, pp. 215-224, Louvain, Belgique, 1999

ZHANG Zhonghua, WOMHAM W.M., STCT: An efficient algorithm for supervisory control design, Symposium on Supervisory Control of Discrete Event Systems, SCODES 2001

ZHONG Hoa, WONHAM W. Murray, On the consistency of hierarchical supervision in discrete event systems, *IEEE Transactions on Automatic Control*, 35, 10, 1990

# ANNEXE

**Modèles utilisés pour la synthèse structurée de la commande d'un poste de la Cellule Flexible d'Assemblage de l'AIPL.**

# ANNEXE

Cette annexe présente de manière plus compète les modèles à états utilisés lors de la synthèse du contrôle par le produit des ressources de production, sur l'exemple du manipulateur des postes d'assemblage de la Cellule Flexible d'Assemblage présenté au chapitre 4.

La Figure 151 présente la démarche de synthèse utilisée :

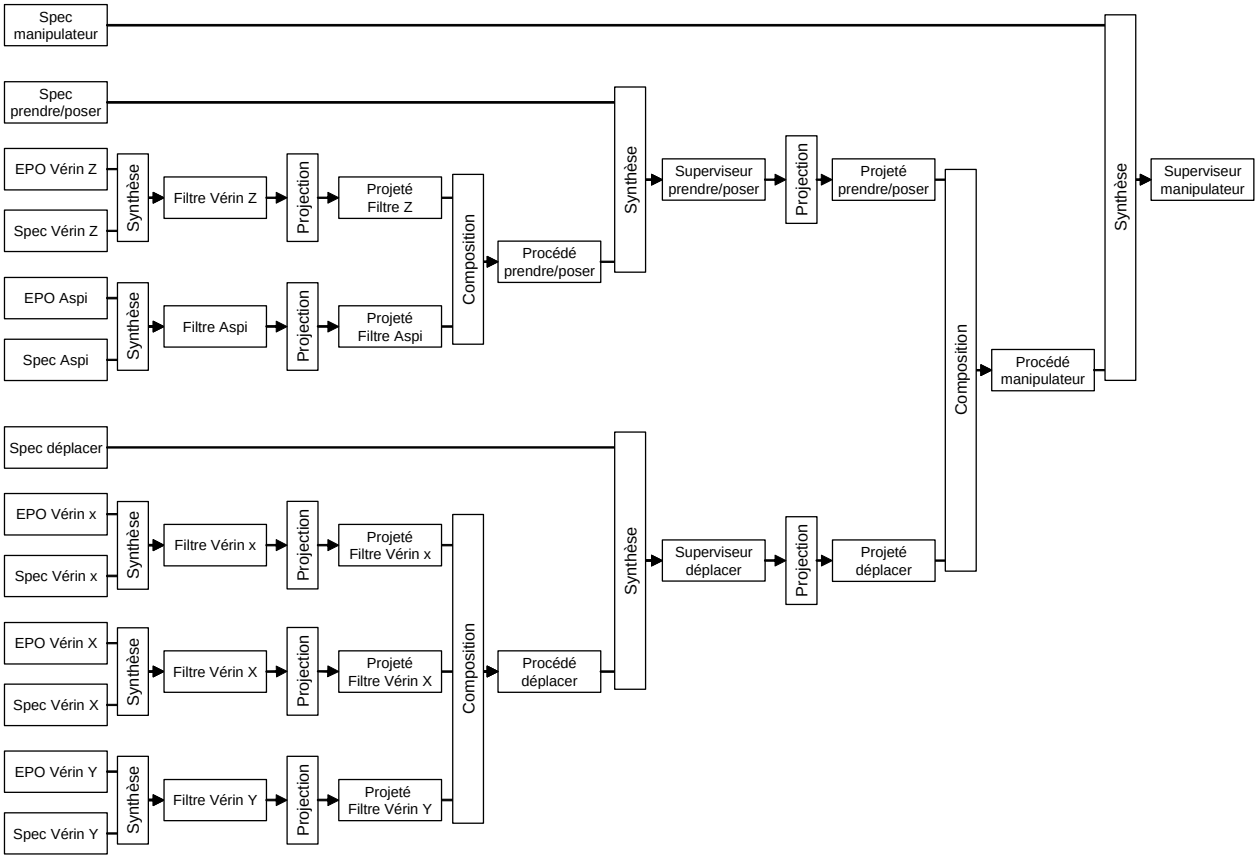



**Figure 151 : Démarche de synthèse structurée utilisée sur le manipulateur**

Les événements utilisés sont récapitulés dans le Tableau 1 :

| Abréviation | Nom de l'événement |
|---|---|
| cr | capteur de fin de course – vérin rentré |
| cs | capteur de fin de course – vérin sorti |
| or | ordre de rentrée du vérin |
| os | ordre de sortie du vérin |
| er | état rentré du vérin |
| es | état sorti du vérin |
| dr | demande de rentrée du vérin |
| ds | demande de sortie du vérin |
| ea | état pièce aspirée |
| el | état pas de pièce aspirée (pièce libérée) |
| da | demande d'aspiration |
| dl | demande d'arrêt d'aspiration |
| dd | demande de descente |
| dh | demande de montée |
| ed | état descendu |
| eh | état haut |
| epo | état pièce posée |
| epr | état pièce prise |
| dpo | demande de pose |
| dpr | demande de prise |
| ei | produit à la position i |
| di | demande pour déplacer le produit à la position i |
| rq xx | requête d'assemblage d'un composant de type xx |
| rp xx | compte-rendu d'assemblage d'un composant de type xx |

**Tableau 5 : Evénements utilisés dans les modèles de l'exemple**

Les Eléments de Partie Opératives « Vérin x », « Vérin X », « Vérin Y » et « Aspiration » ont un comportement similaire, de type bistable. Pour cette raison, leurs modèles à états (Figure 152) seront identiques :

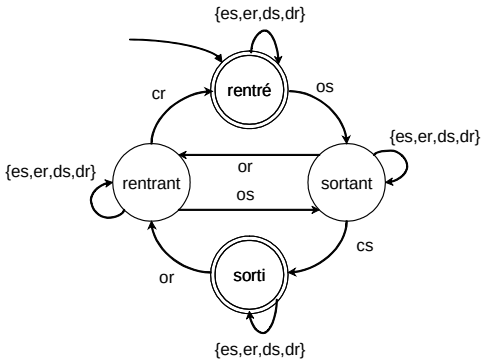



**Figure 152 : Modèle utilisé pour un EPO de type bistable**

Les spécifications utilisées pour la synthèse d'un superviseur d'EPO bistable sont présentées de manière partielles (Figure 153), puis composées de façon synchrone à l'aide de TCT.

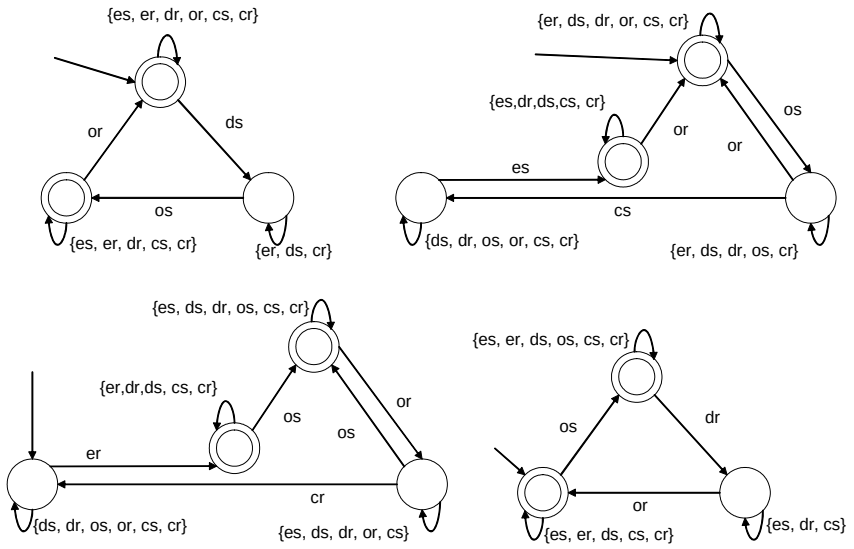



**Figure 153 : Modèles de spécifications pour le superviseur d'un EPO bistable**

A partir des modèles de la Figure 152 et du composé des modèles de spécification de la Figure 153, les algorithmes de synthèse permettent l'obtention du superviseur d'un EPO bistable (Figure 154) :

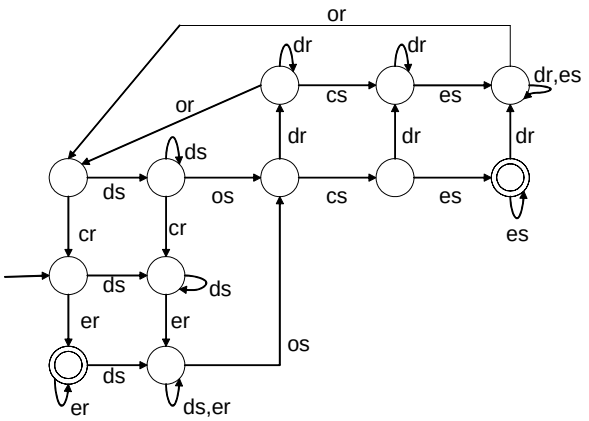



**Figure 154 : Superviseur d'un EPO bistable**

Ce superviseur d'EPO bistable sera instancié quatre fois : pour les EPOs « Vérin x », « Vérin X », « Vérin Y » et « Aspiration ».

L'EPO « Vérin Z », assurant le déplacement vertical des pièces, est le seul de type monostable. Son modèle est donné par la Figure 155 :

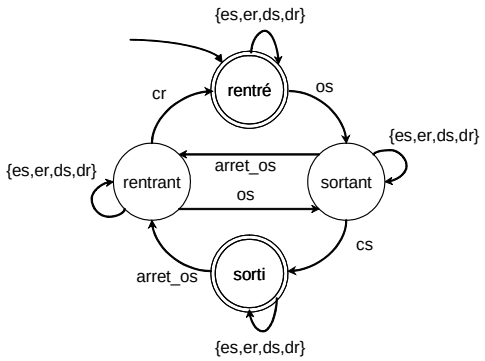



**Figure 155 : Modèle utilisé pour un EPO de type monostable (« Vérin Z »)**

Comme les spécifications utilisées pour la synthèse d'un superviseur d'EPO bistable, les spécifications d'un superviseur d'EPO monostable sont présentées de manière partielles (Figure 156), puis composées à l'aide de TCT.

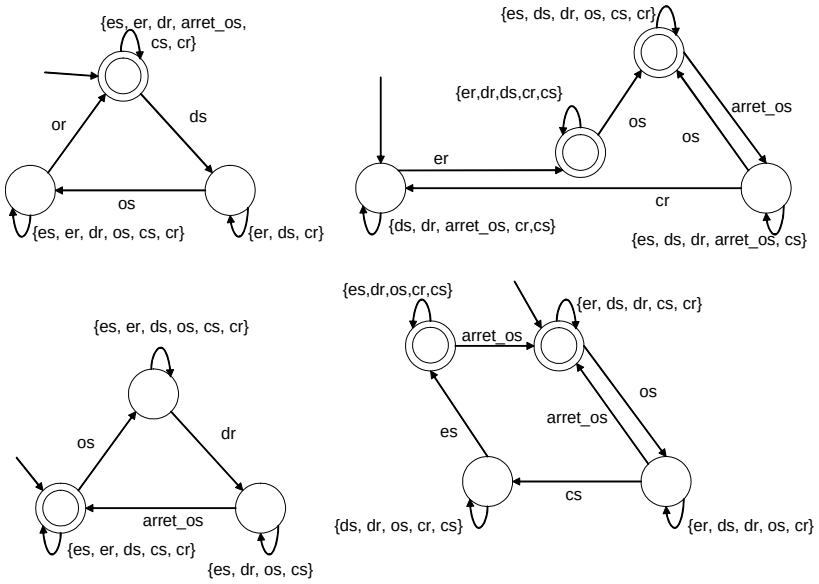



**Figure 156 : Modèles de spécifications pour le superviseur d'un EPO monostable**

Le superviseur de l'EPO monostable « Vérin Z » est donné par la Figure 157 :

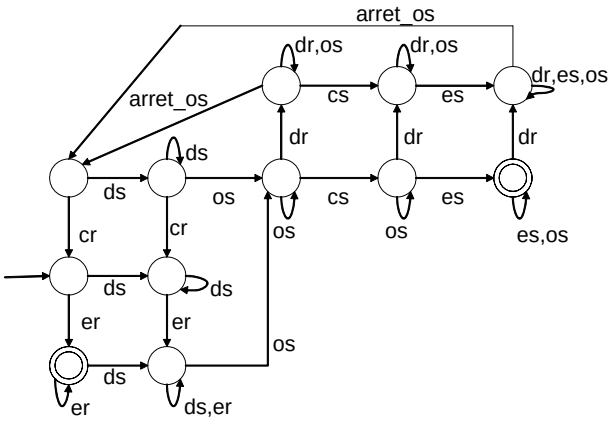



**Figure 157 : Superviseur de l'EPO monostable « Vérin Z »**

Les projections (réalisables à l'aide de TCT) des superviseurs d'EPO bistable et monostable sur l'alphabet des demandes et des états, sont semblables (Figure 158) :

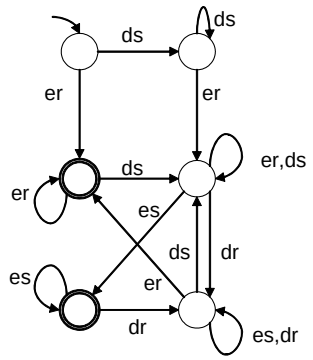



**Figure 158 : Projection des superviseurs d'EPO sur l'alphabet des demandes et des états**

Les modèles de procédé à contrôler pour assurer les fonctions « prendre/poser » et « déplacer » sont respectivement obtenus par la composition des projections du superviseur de l'EPO « Vérin Z » et de l'EPO « Aspiration », et par composition des projections des superviseurs des EPOs « Vérin x », « Vérin X » et « Vérin Y ». Cette composition synchrone est réalisée à l'aide de TCT.

La spécification utilisée pour la synthèse du superviseur de la fonction « prendre/poser » est représentée sur la Figure 159 :

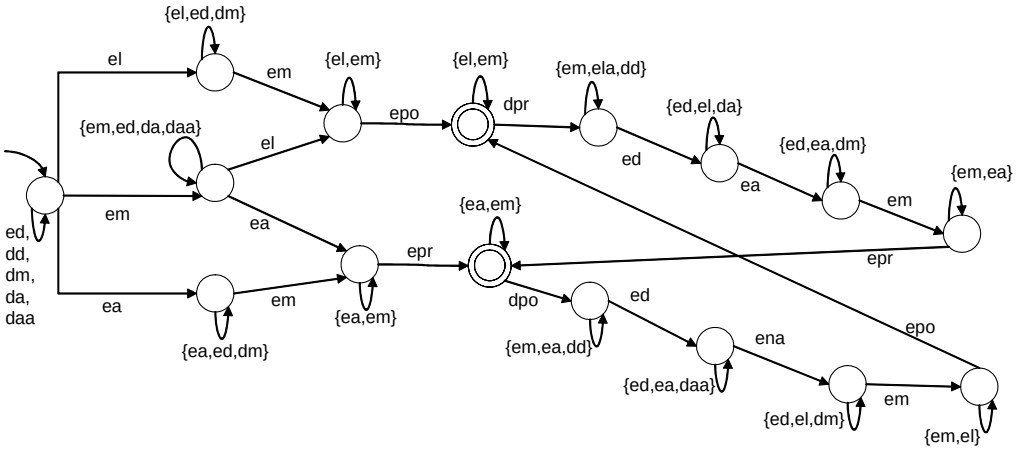



**Figure 159 : Spécification de coordination permettant la synthèse du superviseur « prendre/poser »**

A partir de cette spécification et du composé des projections des superviseurs « Vérin Z » et « Aspiration », les algorithmes de synthèse permettent d'obtenir le superviseur de la fonction « prendre/poser ».

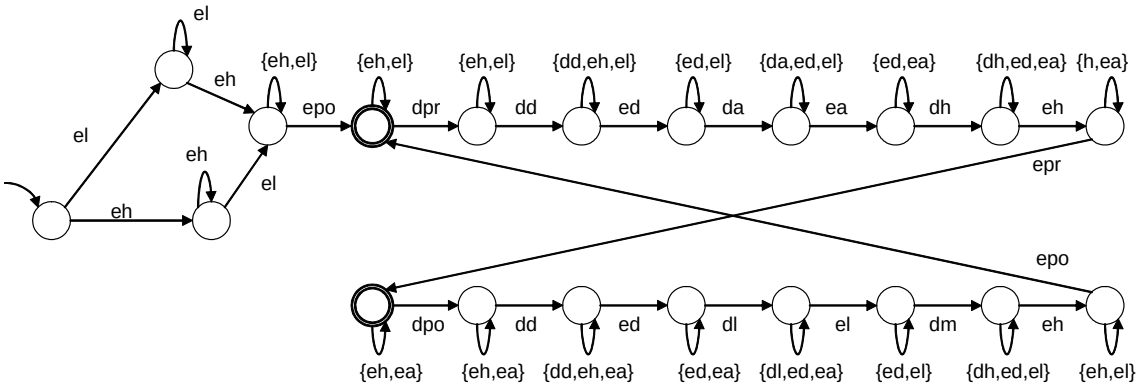



**Figure 160 : Superviseur de la fonction « prendre/poser »**

La spécification utilisée pour la synthèse du superviseur de la fonction « déplacer » est représentée quant à elle par la Figure 161 :

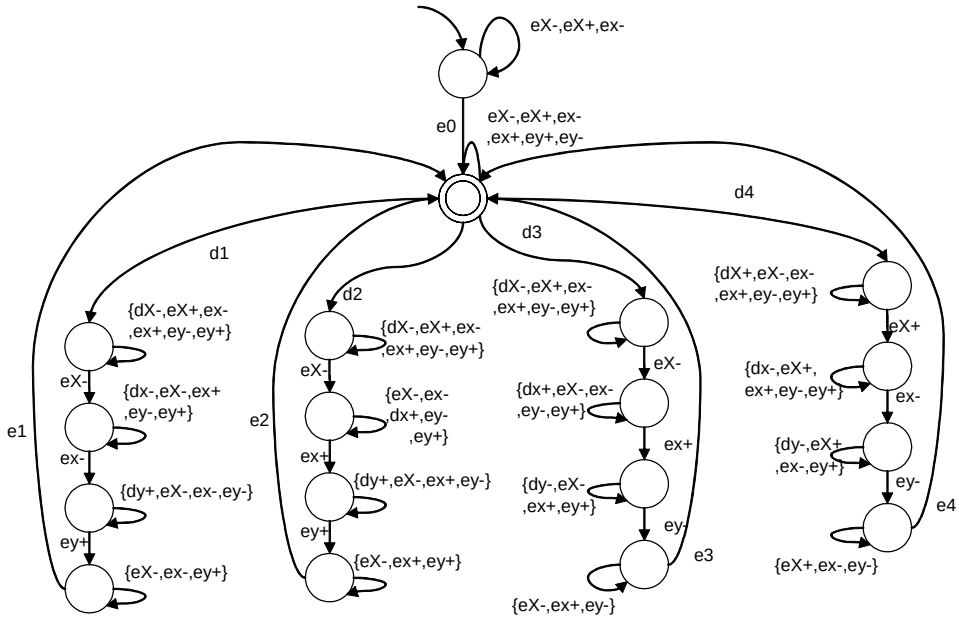



**Figure 161 : Spécification de coordination permettant la synthèse du superviseur « déplacer »**

A partir de cette spécification et du composé des projections des superviseurs « Vérin x », « Vérin X » et « Vérin Y », les algorithmes de synthèse permettent d'obtenir le superviseur de la fonction « déplacer », dont la taille est de 146 états et 592 transitions.

La projection du superviseur de la fonction « Prendre/poser » sur l'alphabet des demandes de « prise » et de « pose » et sur les états « prise » et « posée » est représenté par la Figure 162 :

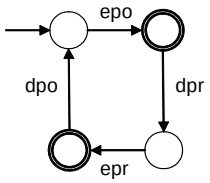



**Figure 162 : Projection du superviseur de la fonction « prendre/poser »**

La projection du superviseur de la fonction « déplacer » sur l'alphabet des demandes de déplacement et des comptes-rendus de fin de déplacement est représenté par la Figure 163 :

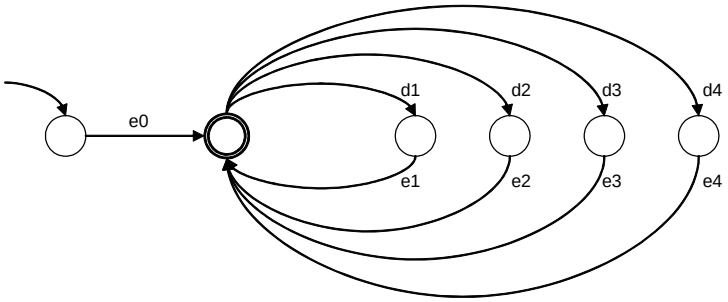



**Figure 163 : Projection du superviseur de la fonction « déplacer »**

La composition synchrone des projections des fonctions « déplacer » et « prendre/poser » donne le modèle du système à contrôler pour assurer la manipulation des pièces. Ce composé a 24 états et 60 transitions.

La spécification du comportement du manipulateur des représenté par la Figure 164 :

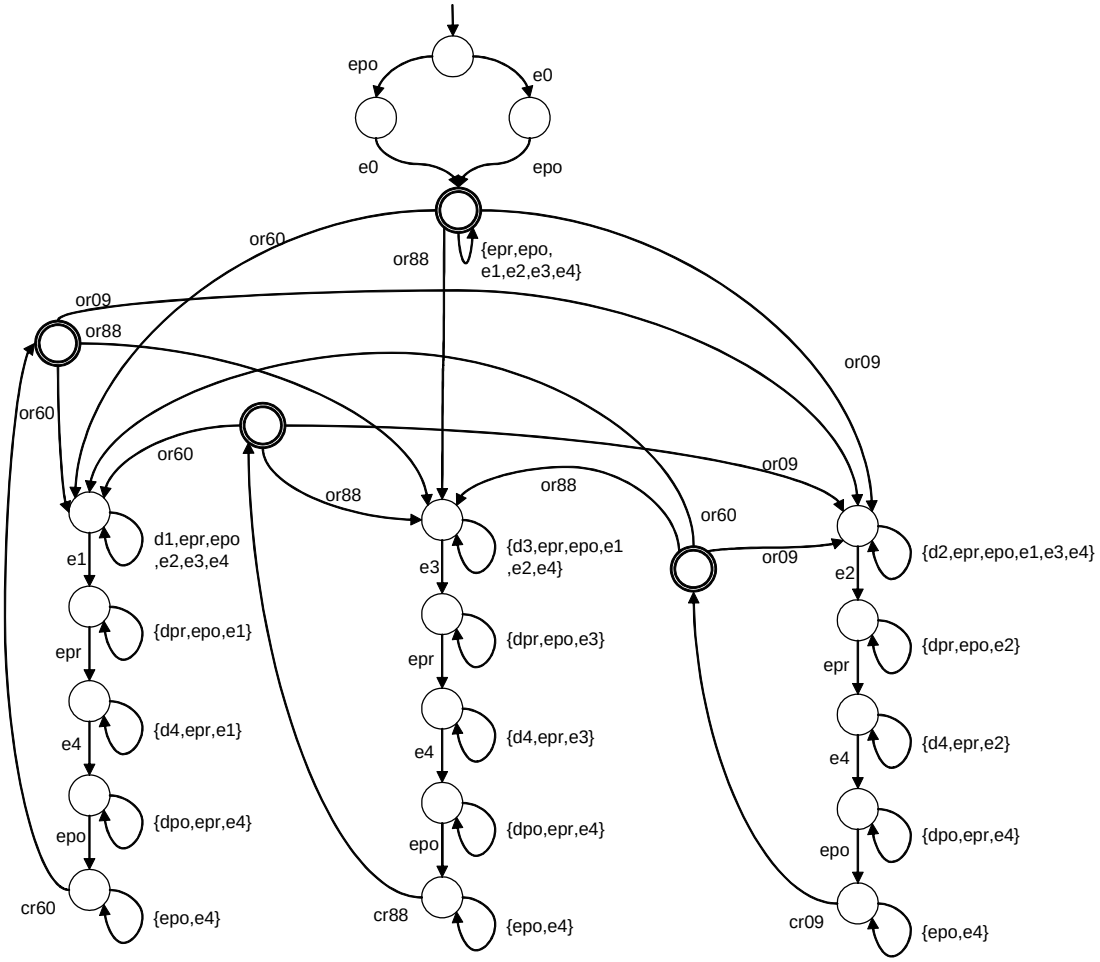



**Figure 164 : Spécification du superviseur de la fonction « manipuler » d'un poste capable d'assembler des pièces de type 09, 60 et 88**

A partir de ces modèles, les algorithmes de synthèse permettent d'obtenir le superviseur du manipulateur (Figure 165) :

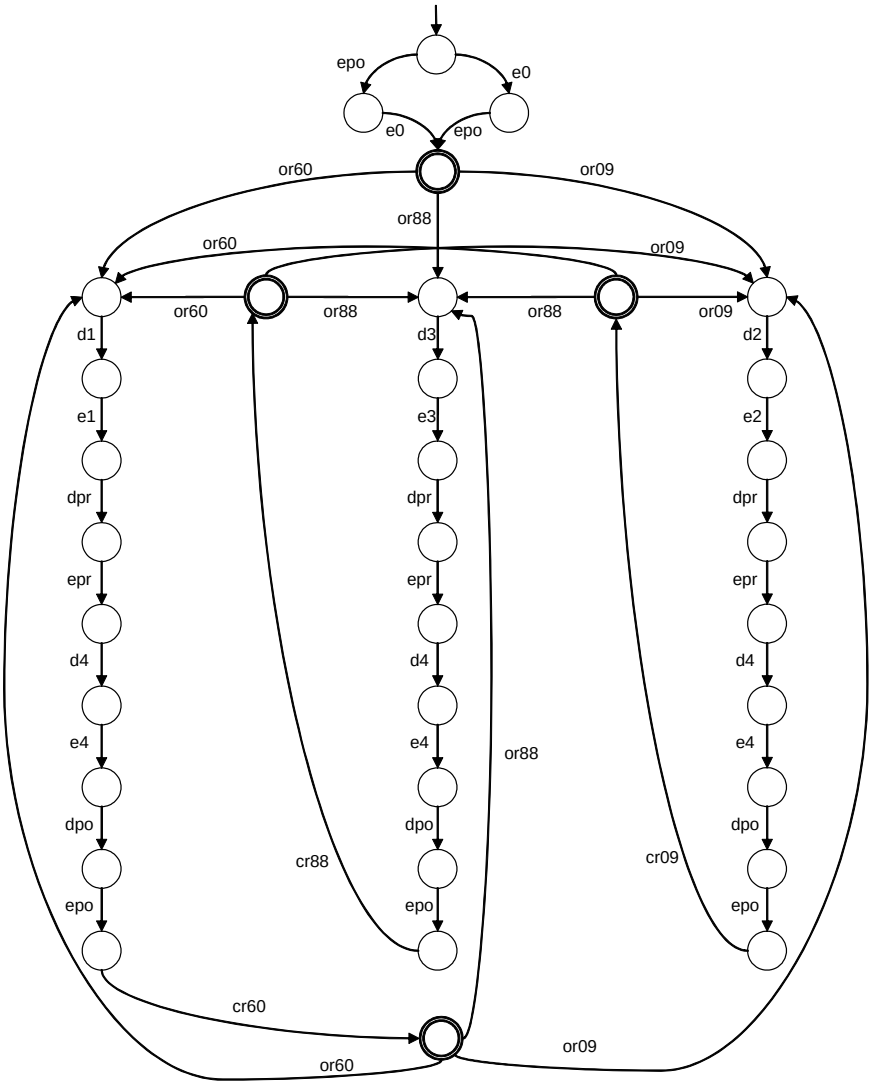



**Figure 165 : Superviseur assurant la fonction « manipuler » d'un poste capable d'assembler des pièces de type 09, 60 et 88**

La projection de ce superviseur sur l'alphabet des opérations réalisées sur le produit par les ressources (Figure 166) correspond au modèle extrait des informations disponibles dans le MES, c'est-à-dire le modèle du poste d'assemblage vu du produit.

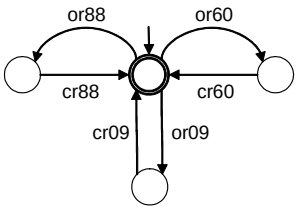



**Figure 166 : Modèle d'un poste d'assemblage capable d'assembler des pièces de type 09, 60 et 88, vu du produit**

Université HENRI POINCARÉ NANCY 1

Monsieur **GOUYON David**

**DOCTORAT de l'UNIVERSITE HENRI POINCARE, NANCY 1**

en AUTOMATIQUE, TRAITEMENT DU SIGNAL, GENIE INFORMATIQUE

VU, APPROUVÉ ET PERMIS D'IMPRIMER N°1020

Nancy, le 23 décembre 2004

Le Président de l'Université

UNIVERSITÉ HENRI POINCARÉ, NANCY I
LE PRÉSIDENT

J.P. FINANCE

Université Henri Poincaré, Nancy I
24-30 rue Lionnois - B.P. 3069 - 54013 NANCY Cédex
Tél. : 03 83 68 20 00 - Fax : 03 83 68 21 00

***Résumé***

Les travaux présentés dans ce mémoire s'inscrivent dans le contexte de l'ingénierie produit/processus des systèmes de fabrication. Ce contexte conduit à repenser l'intégration hiérarchique des procédés de production au profit de structures distribuées plus flexibles et reconfigurables. Plus précisément, la maîtrise de la variabilité des produits, notamment dans le cadre d'une production personnalisée de masse, impose de pouvoir adapter le contrôle de la production aux particularités de chaque produit et d'assurer individuellement leur traçabilité.

Notre contribution porte sur la formalisation d'un cadre de modélisation du contrôle par le produit des systèmes d'exécution de la production, basé sur les techniques de synthèse proposées dans le contexte de la théorie de la commande par supervision de Ramadge & Wonham.

L'originalité de ces travaux consiste à placer le produit au centre de la démarche d'automatisation, en assurant l'interopérabilité entre le contrôle des ressources du système de fabrication et le contrôle par le produit de son routage à travers le système.

***Mots-clés***

Personnalisation de masse, Contrôle par le Produit, Ingénierie d'Automatisation, Modélisation, Synthèse de la Commande, Synthèse de Trajectoires

***Abstract***

Works presented in this report join the context of the product/process engineering of manufacturing systems. This context leads to reconsider the hierarchically integrated production processes to the profit of more flexible and reconfigurable distributed structures. More precisely, the products variability control, especially within the framework of a mass-customized production, imposes the ability to adapt the manufacturing control to the product characteristics while ensuring their individual traceability.

Our contribution focuses on the formalization of a product driven control modeling framework of the manufacturing systems, based on formal synthesis techniques proposed within the context of Ramadge & Wonham Supervisory Control Theory.

The originality of our contribution consists in placing the product at the center of the automation process, by ensuring the interoperability between the control of manufacturing system resources and the control of product routing through the system.

***Keywords***

Mass customization, Product driven control, Automation Engineering, Modelling, Control Synthesis, Routes Synthesis