gar 20-2175

UNIVERSITE DES SCIENCES ET TECHNOLOGIES DE LILLE

Année: 1998 121318151

THESE

pour obtenir le grade de

DOCTEUR DE L'UNIVERSITE

Discipline: PRODUCTIQUE,
AUTOMATIQUE et INFORMATIQUE INDUSTRIELLE

présentée et soutenue publiquement

le 2 décembre 1998

par

Pascal BERRUET

Ingénieur Ecole Centrale de Lille



CONTRIBUTION AU RECOUVREMENT DES SYSTEMES FLEXIBLES DE PRODUCTION MANUFACTURIERE : ANALYSE DE LA TOLERANCE ET RECONFIGURATION

JURY

M. M. COMBACAU	Rapporteur	Maître de Conférences-HDR à l'Université Paul Sabatier (Toulouse III)
M. E. CRAYE	Examinateur	Professeur à l'Ecole Centrale de Lille
M. B. DESCOTES-GENON	Rapporteur	Professeur à l'Université Joseph Fourier (Grenoble I)
M. S. ELKHATTABI	Examinateur	Maître de Conférences à l'Ecole Centrale Lille
M. J.C. GENTINA	Examinateur	Professeur à l'Ecole Centrale Lille, Président
M. R. SOENEN	Rapporteur	Professeur à l'Université de Valenciennes et du Hainaut-Cambrésis
M. M. STAROSWIECKI	Examinateur	Professeur à l'Université de Lille I
M. A.K.A. TOGUYENI	Examinateur	Maître de Conférences à l'Ecole Centrale Lille

Directeurs de thèse: E. CRAYE, A.K.A. TOGUYENI, S. ELKHATTABI

Thèse préparée au Laboratoire d'Automatique et Informatique industrielle de Lille L.A.I.L. UPRESA CNRS 8021 - Ecole Centrale de Lille

Les travaux présentés dans ce mémoire ont été développés au Laboratoire d'Automatique et d'Informatique Industrielle de Lille (L.A.I.L.), UPRESA CNRS n° 8021, au sein de l'ipe Production Flexible Manufacturière (P.F.M.) dirigée par le Professeur Jean Claude GENTINA, directeur de l'Ecole Centrale de Lille. Je tiens à le remercier pour son accueil et également pour m'avoir sensibilisé à la recherche durant ma dernière année d'études d'ingénieur à l'Ecole Centrale de Lille.

Je tiens très sincèrement à remercier les trois rapporteurs de ce travail :

- Monsieur Michel COMBACAU, Maître de Conférences-HDR à l'Université Paul Sabatier (Toulouse III),
- Monsieur Bernard DESCOTES-GENON, Professeur à l'Université Joseph Fourier (Grenoble I),
- Monsieur René SOENEN, Professeur à l'Université de Valenciennes et du Hainaut-Cambrésis.

Leurs remarques, tant sur la forme que sur le contenu, ont contribué à faire progresser la qualité de ce mémoire.

Mes remerciements vont à mes directeurs de recherche, Monsieur Etienne CRAYE, Professeur à l'Ecole Centrale de Lille, Monsieur Abdoul Karim Armand TOGUYENI, Maître de Conférences à l'Ecole Centrale Lille, et Monsieur Samir ELKHATTABI, Maître de Conférences à l'Ecole Centrale Lille, pour leurs conseils et remarques pertinentes, pour leur disponibilité et pour la liberté d'initiative dont j'ai disposé.

Je suis extrêmement reconnaissant à Monsieur Jean Claude GENTINA, Professeur à l'Ecole Centrale de Lille et à Monsieur Marcel STAROSWIECKI, Professeur à l'Université des Sciences et Technologies de Lille et Directeur du LAIL, pour l'intérêt qu'ils portent à mes travaux en acceptant de prendre part à mon jury.

Je voudrais remercier l'ensemble des membres du LAIL pour leur sympathie, leur disponibilité et l'aide qu'ils ont pu m'apporter. Par leurs remarques pertinentes, ils ont stimulé mon travail de recherche. Lorsque des problèmes techniques sont survenus, ils n'ont pas hésité à m'apporter leur soutien afin que je respecte les échéances.

J'associe également Madame DUPLOUICH, du service de documentation, et Monsieur VANGREVENINGE, qui a assuré la reprographie de ce mémoire.

Je dédie les lignes qui suivent à tous ceux qui m'ont aidé durant cette période. Je pense en particulier à Karine mon épouse, à mes parents, qui ont su me comprendre, me réconforter et me donner l'énergie nécessaire pour mener à bien ce travail.

SOMMAIRE

Notations et abrevations		
Introduction générale		
Partie A : D'une intégration des fonctions de la Supervision au Recouvrement		
Chapitre I : Contexte de l'étude	9	
1. LES SYSTÈMES FLEXIBLES DE PRODUCTION MANUFACTURIÈRE	10	
1.1 LES SYSTÈMES À EVÉNEMENTS DISCRETS	10	
1.2 La Flexibilité		
1.2.1 Définition		
1.2.2 Typologie		
1.2.2.1 Flexibilité de gammes		
1.2.2.2 Flexibilité au niveau ressource		
1.2.2.3 Flexibilité d'architecture		
1.3 DÉFINITION ET CARACTÉRISTIQUES DES SFPM ÉTUDIÉS		
1.3.1 Définition		
1.3.2 Caractéristiques principales		
1.3.3 Complexité		
2. AUTOMATISATION DES SFPM: INTÉGRATION, SUPERVISION	16	
2.1 EVOLUTION DE L'AUTOMATISATION	16	
2.2 CIM ET SES CONCEPTS		
2.3 LES MÉTHODOLOGIES CIM		
2.3.1 Les différentes approches		
2.3.2 Le projet CASPAIM		
2.3.2.1 Démarche de conception de la commande	23	
2.3.2.2 Bilan		
2.3.2.2.1 Limites		
2.3.2.2.2 Evolution : de l'interface à la supervision		
2.3.3 Conclusion		
3. LA SUPERVISION DES SFPM	27	
3.1 DÉFINITION DE LA SUPERVISION	27	
3.2 ETAT DE L'ART		
3.2.1 Approches issues de la théorie de la supervision		
3.2.1.1 Rappels sur la théorie de Ramadge et Wonham		
3.2.1.2 La commande supervisée		
3.2.1.3 La sécurité opérationnelle		
3.2.2 Approches systèmes		
3.2.2.1 Travaux du CRAN		
3.2.2.2 Travaux du LAMIH		
3.2.2.4 Travaux du LAAS		
3.2.2.5 Travaux du LAIL équipe PFM		
3.2.2.5.1 Travaux sur la surveillance		
3.2.2.5.2 Travaux sur la Gestion des Modes	47	
3.2.2.5.3 Travaux sur le pilotage		
3.2.2.6 Autres contributions		
3.2.3 Conclusion	49	

Chapitre II: Vers une approche de la supervision par le recouvrement	50
1. PROPOSITION D'UNE STRUCTURATION DE LA SUPERVISION	51
1.1 Présentation générale	51
1.1.1 Schéma de fonctionnement spécifié	53
1.1.2 Schéma de réaction après défaillance	
1.1.3 Remarques	
1.2 DÉTAIL DES FONCTIONS	
1.2.1 Le pilotage	54
1.2.2 La surveillance	
1.2.2.1 Le système de détection / filtrage	
1.2.2.2 Le système de diagnostic	57
1.2.3 Le module de recouvrement	
1.2.4 La gestion des modes	59
1.3 LA SUPERVISION DANS CASPAIM	60
2. LE RECOUVREMENT	63
2.1 RÔLE	
2.1.1 Définition	
2.1.2 Flux d'informations	
2.2 ACTIONS ENVISAGÉES POUR PALIER À UNE DÉFAILLANCE	65
2.2.1 Types de défaillances	65
2.2.2 Actions sur la commande	66
2.2.3 Actions sur le procédé	
2.2.3.1 Actions immédiates	
2.2.3.2 Actions différées	
2.2.3.2.1 Arrêt / réparation	
2.2.3.2.2 Marche dégradée de la ressource	69
2.2.3.2.3 Reconfiguration du SFPM	
3. RECOUVREMENT ET MODÈLE DE LA PARTIE OPÉRATIVE	
3.1 BESOIN D'UN MODÈLE	
3.1.1 Informations nécessaires au recouvrement	
3.1.2 Insuffisances des modèles existants	
3.2 OBJECTIFS ET CONTRAINTES DU MODÈLE	
3.2.1 Objectifs associés au modèle	75
3.2.2 Contraintes requises	76
3.3 Vers un modèle	77
3.3.1 Hypothèses de modélisation	<i>77</i>
3.3.2 Principe adopté	
3.3.3 Définitions et terminologie associées aux briques de base du modèle	79
3.3.3.1 Concept d'opération	79
3.3.3.2 Propriétés liées aux opérations	
3.3.3.3 Typologie des opérations	
3.3.4 Caractéristiques élémentaires associées aux opérations	85
Conclusion	87

Partie B :

La tolérance des architectures flexibles

Introduction	90
Chapitre III: Définition de la tolérance dans le cadre de la sûreté de fonctionneme	ent92
1. LA SÛRETÉ DE FONCTIONNEMENT DES SFPM	93
1.1 CONCEPTS DE BASE	93
1.1.1 Définitions	93
1.1.2 Moyens de mesure	
1.1.3 Application de la sûreté de fonctionnement aux SFPM	
1.2 ETUDE DE LA DISPONIBILITÉ DES SYSTÈMES	
1.2.1 Méthodes et modèles utilisés	
1.2.1.1 AMDEC	
1.2.1.2 Arbre de défaillances	
1.2.1.4 Modèles état / transition	
1.2.2 Critères relatifs à la disponibilité	
2. LA TOLÉRANCE AUX PANNES DES SFPM	
2.1 Définitions	
2.1.1 SFPM tolérant / SFPM tolérant vis à vis d'une gamme	
2.1.2 La criticité	
2.2 TOLÉRANCE ET DISPONIBILITÉ	105
1. PRÉSENTATION DU GRAPHE D'ACCESSIBILITÉ OPÉRATIONNELLE	
1.1 Les entités du modèle	
1.2 LES RELATIONS D'ACCESSIBILITÉ	
1.2.1 Choix d'un type de relation	
1.2.2 Définition de l'accessibilité	
1.2.3 Implication sur la disponibilité d'une opération	
1.3 CHOIX D'UN OUTIL SUPPORT	
1.4 CONSIDÉRATIONS ASSOCIÉES AU MODÈLE	114
1.4.1 Propriétés structurelles du GAO	
1.4.2 Intérêt du modèle	115
2. DÉMARCHE D'OBTENTION DU MODÈLE	117
2.1 Présentation de la démarche	
2.2 OBTENTION DES CONSTITUANTS DU MODÈLE	
2.2.1 Les opérations élémentaires (étape 1)	
2.2.2 Les opérations agrégées (étape 2)	
2.2.2.1 Opération d'usinage agrégée	
2.2.2.2 Opération de liaison	
2.2.3 Les noeuds (étape 3)	
2.3 ILLUSTRATION DE LA DÉMARCHE	

3. CARACTÉRISTIQUES UTILISÉES POUR LA TOLÉRANCE	126
3.1 CARACTÉRISTIQUES PROPRES AUX ENTITÉS	127
3.1.1 Caractéristiques associées aux noeuds	127
3.1.2 Caractéristiques associées aux opérations	128
3.2 RELATION ENTRE CARACTÉRISTIQUES PROPRES ET CARACTÉRISTIQUES INDUITES	129
3.2.1 Caractéristiques induites par les opérations sur les noeuds	129
3.2.2 Caractéristiques induites par les noeuds sur les opérations	129
Chapitre V: Evaluation de la tolérance d'une architecture	131
1. PRINCIPE ET POSITIONNEMENT DE LA DÉMARCHE	132
1.1 PRINCIPE DE LA DÉMARCHE D'ÉVALUATION DE LA TOLÉRANCE	132
1.2 POSITIONNEMENT DANS UNE DÉMARCHE DE CONCEPTION	133
2. DÉTERMINATION DES OPÉRATIONS ET RESSOURCES CRITIQUES	135
2.1 Présentation de la méthode	
2.2 RECHERCHE DES OPÉRATIONS CRITIQUES	
2.2.1 Détermination des opérations significatives	
2.2.1.1 Cas d'une opération de transfert	
2.2.1.2 Cas d'une opération de stockage actif	
2.2.1.3 Cas d'une opération de libre passage	139
2.2.2 Détermination des opérations critiques	
3. PROPOSITION DE CRITÈRES DE TOLÉRANCE	
3.1 CRITÈRES DE TOLÉRANCE DANS L'ABSOLU [BER 97/C]	
3.1.1 Evaluation de la flexibilité organisationnelle	
3.1.1.1 Indice de criticité absolu par opérations	
3.1.1.2 Indice de criticité absolu par ressources	
3.1.2 Evaluation de la sévérité d'une panne	
3.1.2.1 Taux de criticité moyen par opérations critiques	
3.1.2.2 Taux de criticité moyen par ressources critiques	
3.1.2.3 Taux de criticité maximal par opérations / ressources critiques	
3.2 PRISE EN COMPTE D'UNE PRODUCTION DONNÉE [BER 98/A]	
3.2.1 Indice de criticité par opérations relativement à une gamme logique	143
3.2.2 Indice de criticité par ressources relativement à une gamme logique	
3.3 PRISE EN COMPTE DE DONNÉES STOCHASTIQUES	
3.3.1 Indice de criticité absolu pondéré par ressources	
3.3.2 Taux de criticité moyen pondéré par ressources critiques	
4. APPLICATIONS DES CRITÈRES DE TOLÉRANCE	
4.1 ETABLISSEMENT DE RÈGLES DE CONCEPTION	147
4.1.1 Démarche expérimentale	147
4.1.2 Quelques résultats	147
4.2 ANALYSE DES ARCHITECTURES FLEXIBLES	149
4.2.1 Tolérance et flexibilité	149
4.2.1.1 Tolérance : une mesure de la flexibilité	
4.2.1.2 Proposition d'un classement des architectures à partir de leur tolérance	
4.2.2 Tolérance et productivité	
4.2.3 Vers une analyse multi-critères des architectures	152
Conclusion	153

Partie C:

La reconfiguration des SFPM

Introduction	156
Chapitre VI: Reconfiguration et structuration du recouvrement	157
1. CARACTÉRISATION DE LA RECONFIGURATION	
1.1 BUT ET PRINCIPE DE LA RECONFIGURATION	158
1.2 LE PROCESSUS DE RECONFIGURATION	158
1.2.1 Aspect décisionnel	159
1.2.2 Aspect opérationnel	159
1.3 CONTRAINTES DE LA RECONFIGURATION	160
1.3.1 Contraintes générales	161
1.3.2 Contraintes spécifiques aux produits	161
1.3.3 Contraintes spécifiques aux modes	162
1.4 HYPOTHÈSES LIÉES AU CONTEXTE CASPAIM	
1.4.1 Prise en compte des flexibilités	
1.4.2 Implication de l'ordonnancement	
1.4.3 Mécanismes de reconfiguration de la commande	
1.4.3.1 Reconfiguration par téléchargement de programmes	164
1.4.3.2 Reconfiguration par adaptation dynamique de la structure de la commande	
1.4.4 Modes pris en compte	
1.5.1 Reconfiguration mineure	
1.5.2 Reconfiguration significative	
1.5.3 Reconfiguration majeure	
2. STRATÉGIES DE RECOUVREMENT	
2.1 TRAITER LES PRODUITS PRÉSENTS DANS LE SFPM	
2.1.1 Evacuation des produits	
2.1.2 Poursuite de la gamme	
2.1.3 Passage par un poste de litige	
2.2 REDUIRE L'INDISPONIBILITÉ DU SFPM 2.2.1 Finir une partie de la production en cours	
2.2.2 Changer de type de production	
2.3 SYNTHÈSE: ENCHAÎNEMENT DES STRATÉGIES	
3. PROPOSITION D'UNE STRUCTURATION DE LA FONCTION DE RECHEI	
CONFIGURATION DU RECOUVREMENT	
3.1 Présentation générale	175
3.2 DÉTAIL DES FONCTIONS	
3.2.1 Impact de la panne	
3.2.2 Evaluation du système	
3.2.2.1 Détermination des fonctions de transformation délivrées	
3.2.2.2 Capacité à poursuivre une gamme	177
3.2.3 Recherche de potentialités supplémentaires	
3.2.4 Détermination d'une autre production	
3.2.5 Recherche de séquences d'opérations réalisant une gamme	
3.2.6 Evaluation des séquences	
3.2.7 Détermination de la nouvelle configuration	
3.2.8 Estimation de la production sous la nouvelle configuration	179
3.3 EXEMPLES DE RÉACTIONS	
3.3.1 Recherche progressive de potentialités	
3.3.2 Décisions de type gestion de production	181

Chapitre VII: Procédure de recherche de configuration	183
1. ANALYSE DES BESOINS DE LA PROCÉDURE DE RECHERCHE DE CONFIGURATION	184
1.1 IMPLICATION DU PRINCIPE DE RECHERCHE PROGRESSIVE	186 <i>186</i>
2. ENRICHISSEMENT DU MODÈLE	
2.1 INTERACTIONS DU MODÈLE AVEC LE SYSTÈME DE SURVEILLANCE 2.1.1 Ajout de caractéristiques aux entités du modèle	187 188 189 190 192 192 192 193
2.2.2 Application à la procédure de recherche de configuration	194 195
3. PROCÉDURE DE RECHERCHE DE CHEMINS DANS LE GAO	196
3.1 PRINCIPE: SÉPARATION ENTRE RECHERCHE D'EXISTENCE ET DÉTERMINATION EXPLICITE 3.2 SPÉCIALISATION DE LA CARACTÉRISTIQUE D'ACCESSIBILITÉ	197 198 199 199
4. APPLICATION DES RÉSULTATS DE LA TOLÉRANCE À LA RECHERCHE DE CONFIGURATION	202
4.1 ANALOGIE ENTRE LES DEUX APPROCHES 4.2 CONSÉQUENCES 4.2.1 Conséquences générales 4.2.2 Connaissance des éléments sensibles 4.3 EVOLUTIONS APPORTÉES [BER 98/C] 4.3.1 Extension de la détermination des opérations critiques 4.3.2 Nouvelle procédure	203 203 204 204 205
5. EXEMPLE D'APPLICATION	206
Conclusion	208
Conclusion générale	
Références bibliographiques	215
Annexes	227
Liste des figures	251

Notations et abréviations

Acc.E.: Accessible depuis l'Entrée.

Acc/GL: Accessible vis à vis d'une Gamme Logique.

Blq.S.: Bloquant vers la Sortie.

COD: Chargement Opération Déchargement.

Crit/ f_i : Critique par rapport à la fonction de transformation f_i .

GAO: Graphe d'Accessibilité Opérationnel.

GF: Graphe Fonctionnel.

GL : Gamme Logique ou séquence de fonctions de transformation.

GOE : Gamme Opératoire Etendue.

PC: Partie Commande.

PO: Partie Opérative.

RdP: Réseau de Petri.

SAP: Système Automatisé de Production.

SED : Système à Evénement Discret.

SFPM : Système Flexible de Production Manufacturière.

SI : Système d'Information.

 F_j : Ensemble des opérations mettant en œuvre la fonction f_j ; cet ensemble s'identifie à la fonction.

N_k: Ensemble des opérations composant le nœud k.

R_i: Ensemble des opérations réalisée par la ressource Ri ; cet ensemble s'identifie à la ressource.

Op_{Ri-fj}: Opération réalisée par la ressource Ri et mettant en oeuvre la fonction f_i.

 Σ_{op} : Ensemble des opérations du GAO.

 Σ_N : Ensemble des nœuds du GAO.

 Σ_A : ensemble des arcs du GAO.



Introduction générale

Contexte

Pour faire face à la concurrence, toujours plus importante, les entreprises manufacturières se sont dotées de systèmes automatisés de production. La tendance actuelle s'oriente vers des systèmes produisant des petites et moyennes séries et capables de s'adapter aux changements de production, afin de répondre aux exigences de diversité, de productivité et de qualité, imposées par le marché. Ces systèmes, appelés Systèmes Flexibles de Production Manufacturière (SFPM), sont un compromis entre, d'une part les chaînes de production de type lignes de transfert automatisées à très haute productivité, mais conçues pour des productions de grande série, et d'autre part des installations manuelles à très faible automatisation permettant une production unitaire. La classe de ces systèmes est exclusivement constituée des systèmes à événements discrets (SED). Les produits sont solides et individuellement localisables tandis que le processus évolue de façon discontinue dans le temps. L'objectif pour un SFPM est d'obtenir la productivité la plus élevée tout en conservant un haut niveau de flexibilité, permettant de s'adc eter aux variations de la demande.

Après une recherche, toujours plus poussée, de productivité, passant par une utilisation maximale de l'ensemble des équipements, le constat est apparu qu'il est inutile d'avoir un SFPM virtuellement performant s'il est constamment à l'arrêt du fait de la panne d'un de ses éléments. De ce fait, le traitement des perturbations intéresse de plus en plus les industriels. Dans cette recherche de productivité, l'étude de la sûreté de fonctionnement de tels systèmes est donc devenue un facteur incontournable. Au travers de l'évaluation des paramètres de fiabilité et de disponibilité, sa finalité vise à étudier les effets de défaillances sur le système afin d'en réduire le temps d'immobilisation complète.

Problématique

Nous nous intéressons au cas des défaillances complètes d'éléments constitutifs du système, qui nécessitent une maintenance curative afin de remettre en état l'entité. La problématique qui se pose est la suivante : comment poursuivre la mission du SFPM alors qu'une panne affecte certains éléments du système ?

Il faut donc déterminer s'il est envisageable de poursuivre les productions en cours ou plus généralement si le SFPM conserve une activité de production compatible avec ce qui a été planifié. L'étude considère le SFPM une fois une panne détectée et diagnostiquée et envisage des types de fonctionnements autres que l'arrêt complet du SFPM. Afin de limiter le temps

d'arrêt complet du SFPM, il peut être envisagé, pendant la réparation de l'élément en panne, d'agir sur la commande, de remettre en production des ressources non utilisées jusqu'alors car non sollicitées.

L'insuffisance d'une commande, conçue le plus souvent dans l'hypothèse de pannes rares, a amené à définir le concept de supervision. En cas de panne, son principal rôle va consister à tenir compte des potentialités (réalisation de différents usinages, transferts selon différents cheminements, ...) offertes par les équipements (machines outils à commande numérique, robots, convoyeurs, ...) afin de coordonner ces derniers.

Alors que les flexibilités du SFPM étaient plutôt prises en compte en vue d'autoriser différents types de production, l'objectif est maintenant d'utiliser au mieux ces flexibilités, voire d'en introduire judicieusement de nouvelles, afin de réagir face à une défaillance. Il s'agit de déterminer si les fonctions de transformation du SFPM sont toujours disponibles malgré la panne. Plus particulièrement, il s'agit d'étudier quels types de production le système est toujours en mesure de produire, lorsqu'une panne vient altérer le fonctionnement du SFPM, et quelle est la nouvelle configuration du système lui permettant de produire les pièces choisies.

Les points de vue à considérer relèvent à la fois de la conception et de l'exploitation.

Contribution

Notre activité de recherche est intégrée dans l'équipe Production Flexible Manufacturière (PFM) au sein du Laboratoire d'Automatique et d'Informatique Industrielle de Lille (L.A.I.L. UPRESA CNRS 8021). Les centres d'intérêt d'une telle équipe sont la spécification, la modélisation, la conception, la validation, l'implantation et l'exploitation du contrôle/commande et du procédé des systèmes de production manufacturière.

Durant la phase de conception, nous étudions la disponibilité des fonctions de transformation du SFPM en présence de la panne supposée d'un élément. En exploitation, nous déterminons, lorsqu'une panne vient altérer le potentiel productif du SFPM, quelle est la nouvelle configuration du système lui permettant de continuer à produire.

Les travaux relèvent à la fois des disciplines automatique appliquée aux SED et informatique. Les travaux relatifs à la supervision et au recouvrement sont abordés sur le plan national par les équipes du CRAN, GRAI, LAAS, LAB, LAG, LAI, LAMIH, comme cela sera détaillé au cours du chapitre I. Au LAIL, nous nous situons dans le cadre du projet CASPAIM (Conception Assistée de Systèmes de Production Automatisés en Industrie Manufacturière). Ce projet vise à définir une méthodologie d'intégration mettant très étroitement en œuvre les

approches décisionnelles, informationnelles et opérationnelles. Plutôt que de baser la conception d'un SFPM sur des développements technologiques très pointus permettant simplement l'interfaçage d'entités indépendantes, le projet CASPAIM vise une intégration forte par la définition de méthodologies de conception concernant l'activité de production. L'approche est systémique et englobe les points de vue de la commande et de la supervision.

Notre contribution se situe au niveau de la supervision des SFPM et concerne principalement le recouvrement. Elle considère la défaillance du procédé dans le domaine des SED. Deux axes sont considérés.

Le premier axe de notre étude concerne l'évaluation d'architectures de systèmes de production quant à leur tolérance vis à vis de pannes. Il part du constat que la Supervision ne sera jamais aussi efficace que si le SFPM admet des degrés de liberté afin de répondre aux aléas. L'étude porte sur l'analyse des propriétés des SFPM en terme de flexibilité et de tolérance. Cette dernière se définit comme l'aptitude du SFPM à conserver un caractère opérationnel malgré l'altération de certains de ses éléments. L'analyse est fondée sur l'utilisation d'un modèle de la partie opérative, le Graphe d'Accessibilité Opérationnelle (GAO), qui se présente sous la forme d'un graphe dont les noeuds sont composés d'opérations. Cet outil permet d'étudier l'impact de la disparition d'une opération sur le graphe en terme d'accessibilité et de blocage vis à vis des autres opérations et en terme de criticité par rapport aux fonctions délivrées par le SFPM. L'évaluation est aussi quantitative afin de permettre de dimensionner les architectures quant aux ressources qui les composent et à l'agencement de ses dernières.

Le deuxième axe concerne la reconfiguration du SFPM après défaillance. A cet effet, le GAO est utilisé. Il permet d'analyser l'impact d'une défaillance sur la capacité du SFPM à continuer avec sa production et va donner les éléments à utiliser pour une reconfiguration. Une rupture de lien remet en cause les cheminements des pièces au sein de l'architecture de production. Il donne lieu non seulement à une recherche des fonctionnalités restantes, mais également à déterminer quels seront les chemins encore empruntables par une pièce au cours de sa transformation en produit fini. Ces évaluations sont effectuées sur la base des potentialités du SFPM que le recouvrement décide de prendre en compte.

Les exemples traitent des ateliers d'usinage, mais les principes dégagés peuvent s'étendre aux ateliers d'assemblage.

Objectifs du mémoire

Les objectifs principaux du mémoire sont triples. Ils gravitent autour du concept général de la supervision et visent à répondre à la problématique.

- Il s'agit de définir clairement le rôle du recouvrement au sein de la supervision des SFPM. Nous le présentons comme le centre décisionnel sur lequel est fondée l'activité de réaction face à des pannes, mise en oeuvre par la supervision;
- Il s'agit de présenter une procédure qui détermine la nouvelle configuration du SFPM, afin de lui permettre de continuer à produire, malgré la présence d'une panne ;
- Etant donné que le recouvrement utilise certains degrés de liberté de l'architecture, il s'agit aussi de fournir au concepteur des critères objectifs lui permettant de concevoir une architecture possédant une certaine latitude pour mener à bien une réaction face à une panne. Le concept de tolérance aux pannes est ici appliqué, dans son approche passive, aux SFPM.

Les évaluations et prises de décision sont fondées sur l'utilisation d'un modèle. Etant donné que nous nous situons après occurrence (potentielle ou réelle) de la défaillance, et que nous considérons l'ensemble des potentialités de l'architecture de production, nous nous sommes orientés vers une représentation séparée du modèle de la partie opérative et du modèle de la commande.

Au cours du mémoire est également présenté un modèle de la partie opérative mettant en interaction les moyens de production. Il est utilisé à deux fins :

- Déterminer, en phase de conception, les éléments sensibles de l'architecture de production;
- Analyser la capacité d'une architecture de production à poursuivre une production donnée. Cette étape d'analyse sera le point clé de la procédure de détermination d'une nouvelle configuration, utilisée en phase d'exploitation.

Plan du mémoire

L'exposé des travaux est organisé en sept chapitres répartis en trois parties. Les grandes lignes en sont données par la suite.

La partie A expose la démarche nous ayant amené à considérer le recouvrement des SFPM. Partant de la nécessité d'avoir une démarche intégrée non seulement avec la

commande, nous avons abouti à la nécessité de superviser le SFPM. Parmi les domaines couverts par la supervision, l'aspect recouvrement n'avait pas été abordé au sein du LAIL. Cette partie aborde ensuite le recouvrement de façon générale et conclut à la nécessité d'un modèle.

Le chapitre I présente le domaine d'application, à savoir les SFPM. Les concepts de flexibilité, d'intégration sont abordés. Après une étude de la méthodologie de conception CASPAIM développée au LAIL, le concept de supervision de tels systèmes est mis en avant. Un tour d'horizon des différentes contributions en matière de supervision est ensuite établi de façon à positionner notre contribution par rapport à celles existantes.

Le chapitre II précise tout d'abord le rôle de la supervision. Deux contextes sont pris en compte : le fonctionnement normal et le fonctionnement sous défaillance. Une structuration de la supervision est ensuite proposée. Le cas d'une réaction face à une panne voit l'intervention de modules informationnels, décisionnels et opérationnels. Dans cette approche, les aspects décisionnels sont pris en charge par le recouvrement, qui détermine le nouvel état à atteindre pour le SFPM. L'analyse des besoins en information d'une telle fonction décisionnelle amène à définir les spécifications d'un modèle basé sur un système d'information. La fin du chapitre en voit les fondations.

La partie B aborde l'évaluation de la tolérance aux pannes des architectures flexibles. Il s'agit de savoir si l'architecture, telle qu'elle est définie actuellement, laisse suffisamment de degrés de liberté au recouvrement afin de réagir face à des pannes. Cette partie est composée de trois chapitres.

Le chapitre III introduit le concept de la tolérance aux pannes, appliquée aux SFPM. Il aborde dans un premier temps la sûreté de fonctionnement des SFPM en se focalisant principalement sur la disponibilité de ces systèmes. Dans ce contexte, les définitions liées à la tolérance aux pannes, comme la criticité, se déduisent naturellement des objectifs de recherche d'éléments sensibles, liés aux études de disponibilité.

Le chapitre IV s'intéresse à définir complètement le modèle permettant d'évaluer la tolérance aux pannes d'une architecture flexible. Pour ce modèle entités / associations, une association (la relation d'accessibilité) a été privilégiée car elle permet de traduire la coopération des fonctions mises en œuvres par les ressources afin d'assurer l'activité de production du SFPM. Une représentation basée sur les graphes est choisie afin de faciliter les traitements ultérieurs. La démarche d'élaboration complète ensuite l'ébauche présentée au chapitre II.

A partir du modèle précédemment établi, le chapitre V présente une détermination quantitative de la tolérance aux pannes des architectures. La méthode s'intéresse tout d'abord à déterminer les entités critiques. Puis, des critères, fondés sur la connaissance de ces entités sont calculés. Diverses applications de ces évaluations sont ensuite proposées.

La partie C envisage l'utilisation des potentialités de l'architecture, évaluées en partie B. Elle approfondit le système de recouvrement et les mécanismes de décision permettant de choisir une nouvelle configuration lorsqu'une panne vient perturber la configuration initiale du système.

Après avoir caractérisé la reconfiguration, le chapitre VI porte plus particulièrement sur le rôle du recouvrement dans le processus de reconfiguration. Il résume les différentes stratégies considérées afin de permettre au SFPM de fonctionner et de réaliser une production pendant la réparation de l'entité en panne. Une structuration du recouvrement est finalement présentée.

Le chapitre VII est consacré à la mise en œuvre d'une procédure de recherche de configuration basée sur l'utilisation du modèle présenté au chapitre IV. Le principe est fondé sur une recherche de chemins dans le modèle, en considérant l'intégration progressive des potentialités de l'architecture. Les évolutions apportées au modèles, ainsi que les mécanismes d'exploitation sont décrits. Les liens avec les calculs d'évaluation de la tolérance sont soulignés. Permettant de s'affranchir en-ligne d'une partie des calculs déjà réalisés hors-ligne, ils confortent finalement l'intérêt à porter sur les études préliminaires afin de minimiser les calculs en phase d'exploitation.

PARTIE A

D'une intégration des fonctions de la supervision au recouvrement

INTRODUCTION

Cette partie, composée de deux chapitres, a pour objectif de présenter la démarche qui nous a conduits à l'étude du recouvrement des Systèmes Flexibles de Production Manufacturière.

Le chapitre I pose le contexte de l'étude. Les Systèmes Flexibles de Production Manufacturière (SFPM) y sont présentés ainsi que leurs principales caractéristiques. Un accent est mis sur la flexibilité; en particulier, les types de flexibilités qui nous intéressent sont détaillés.

Puis, les implications de l'automatisation des SFPM en matière d'intégration sont mises en avant. Elles aboutissent au concept de CIM (Computer Integrated Manufacturing) sur lequel se fondent des méthodologies de conception. Parmi ces méthodologies, la méthodologie CASPAIM, développée au LAIL, est abordée. Dans ce cadre, nous constatons que les travaux relatifs au développement des fonctions du contrôle / commande des SFPM ont abouti à des modèles spécifiques. De plus, l'intégration de ces travaux a surtout été centrée sur la commande, alors que la recherche d'une intégration plus complète conduit naturellement au concept de supervision.

différentes Un état de détaille l'art les contributions en matière de surveillance / supervision. Il souligne la diversité des approches et permet de positionner la nôtre. Le double rôle de la supervision est souligné : permettre le fonctionnement dans un état déterminé et réagir après occurrence d'une défaillance. Au cours d'une proposition de structuration de la supervision, nous insistons sur le rôle du recouvrement dans le cas d'une réaction après défaillance.

Le chapitre II présente une partie de notre contribution en matière de supervision et de recouvrement des défaillances pour les SFPM. Nous y définissons le rôle de la supervision ainsi que sa structuration. Nous mettons l'accent sur le rôle de réaction face à des pannes ; ce rôle est fondé sur trois systèmes : un système informationnel (la surveillance), un système décisionnel (que nous appelons recouvrement) et un système opérationnel (supporté par la gestion des modes et le pilotage). Ce système décisionnel, qui n'a jusqu'alors pas été abordé dans les travaux relatifs à CASPAIM, va faire l'objet des développements de ce mémoire.

Le recouvrement est une fonction de décision. Il détermine, après défaillance, le nouvel état à atteindre pour le système. Il contribue à l'exploitation sûre des SFPM.Dans ce cadre, la définition des besoins informationnels du recouvrement montre la nécessité d'élaborer un modèle. Compte tenu de l'existant, un nouveau modèle, dont les bases sont posées à la fin du chapitre, est spécifié. Il sera développé et exploité dans les parties suivantes.

Chapitre I:

Contexte de l'étude

Ce chapitre pose le contexte des travaux qui sont présentés dans les chapitres suivants.

Il décrit tout d'abord les caractéristiques SFPM étudiés. Puis, le concept d'intégration est abordé comme une implication de l'automatisation. Dans le cadre des méthodologies CIM, la démarche CASPAIM est étudiée. Ses limites concernant une intégration principalement centrée sur la commande nous amènent à nous intéresser à la supervision.

Après une présentation du rôle de la supervision, la fin du chapitre présente une analyse de l'existant en matière de surveillance / supervision. L'objectif est de montrer la diversité des contributions.

1. Les Systèmes Flexibles de Production Manufacturière

Cette section vise à présenter les Systèmes Flexibles de Production Manufacturière, qui concernent notre étude, ainsi que les notions qui leur sont directement associées.

Que ce soit dans le domaine manufacturier, où le processus de transformation correspond à une séquence de tâches appliquées à des entités localisables individuellement, ou dans le domaine du continu, l'entreprise a de tout temps été confrontée aux exigences du client : fabriquer des produits au bon moment, en quantité nécessaire et suffisante, avec un bon niveau de qualité et au moindre coût. Les Systèmes Automatisés de Production (SAP) en général et les Systèmes Automatisés de Production Manufacturière (SAPM) en particulier sont destinés à répondre à ces objectifs [MOR 93].

Les Systèmes Flexibles de Production Manufacturière (SFPM) se situent parmi les SAPM et visent en plus une réponse sur mesure aux demandes variées de chaque client.

En résumé, les SFPM ont deux caractéristiques fondamentales :

- Ils sont une catégorie particulière de Systèmes Automatisés de Production Manufacturière. A ce titre, ils font partie des Systèmes à Evénements Discrets (SED), c'est-à-dire que leur évolution est régie par des événements;
- Ils intègrent la notion de flexibilité. Comme nous le verrons ultérieurement, la flexibilité est une notion importante qui se situe au centre des réflexions relatives aux SFPM, tant du point de vue conception que du point de vue implantation.

1.1 Les Systèmes à Evénements Discrets

Un Système à Evénements Discrets (SED) est un système pour lequel l'ensemble des états est discret. Un SED est à opposer à un système continu pour lequel l'état est représenté par des grandeurs qui prennent des valeurs dans un domaine continu.

Dans un SED, la connaissance exacte des variations des variables reflétant l'état du système n'est pas considérée comme nécessaire. Les points d'observation du système ne suivent pas, non plus, une loi périodique connue (conduisant à un échantillonnage), mais sont définis par des événements significatifs apériodiques. Son évolution se fait conformément à l'occurrence d'événements qui sont caractéristiques des changements d'état du système. Ces événements se caractérisent par l'ensemble des valeurs qu'ils peuvent prendre et par les dates auxquelles chaque valeur est prise [BON 93].

Dans un SED, tout processus discret est caractérisé par une séquence d'événements. A un certain niveau d'abstraction, le processus peut être considéré comme élémentaire et être, dans ce cas, caractérisé par l'événement de début de processus et l'événement de fin de processus. A titre d'exemple, suivant le niveau de détail, le processus de transfert d'un point A vers un point B, réalisé par un robot, pourra être représenté par les automates de la Figure I-1.

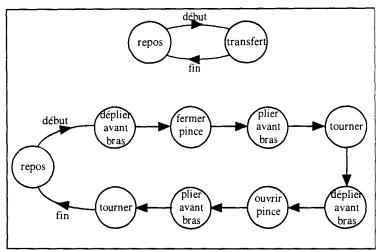


Figure I-1: Exemple de représentation d'un processus discret

Du point de vue de la commande, l'événement de début correspond à un ordre de la partie commande, et l'événement de fin à un compte rendu du procédé. Il est à noter qu'un compte rendu n'est pas nécessairement corrélé à un ordre de la commande.

1.2 La Flexibilité

1.2.1 Définition

La flexibilité intervient au même titre que la qualité du procédé, le coût de fabrication, la capacité de production en quantités variables, comme un critère principal utilisé en industrie pour évaluer la compétitivité d'un système de production [HAR 90], [BAR 96]. Définie à un moment comme la possibilité de produire des pièces de type différent, elle a même été opposée à la productivité, si l'on se réfère à certaines études [HUT 84], montrant que la productivité est la plus importante pour une ligne de production où toutes les opérations sont réalisées séquentiellement, sans possibilité de changer de gamme. Pourtant, le concept de flexibilité est plus vaste. Il reste assez difficile à appréhender et n'a pas été précisément défini. Ceci résulte en partie du fait que les recherches sur ce sujet se sont focalisées sur un aspect particulier du système de production étudié (produit, opération, ressource, ...). Brown et al. [BRO 84] et Buzacott [BUZ 82] se sont intéressés à scinder ce terme général en plusieurs concepts élémentaires. Des définitions plus ou moins proches ont été introduites. Celles-ci peuvent être classées en deux catégories faisant référence à deux notions.

Ainsi, le terme de flexibilité induit une notion de choix parmi des ressources ou une notion d'adaptation face à des perturbations. D'un côté, la flexibilité peut être caractérisée par la diversité des tâches réalisées par le SFPM. D'un autre coté, c'est aussi la facilité qu'aura le système de passer d'un état à un autre, d'une configuration à une autre. Deux définitions peuvent être fournies :

- La flexibilité est l'autorisation d'un choix parmi les ressources d'un SFPM, afin de réaliser une fonction. Elle est considérée comme un degré de liberté du système durant la production. Cette définition touche plus précisément la Partie Commande. Il en résulte une commande qui peut être non-déterministe.
- La flexibilité se définit aussi en terme de capacité et de rapidité d'adaptation à une situation nouvelle [RAN 90]. Cette définition concerne plus spécialement le recouvrement (cf. chapitre II §2), qui détermine, après détection et identification d'une défaillance, le nouvel état à atteindre. Cette flexibilité touche le point de vue de la reconfiguration (cf. partie C). A ce titre, elle est à rapprocher de la flexibilité opérationnelle définie dans [BON 93].

1.2.2 Typologie

Plusieurs types de flexibilité sont détaillés dans la littérature [BUZ 82], [BRO 84], [KUS 86], [SET 90]. Raouf [RAO 95], qui s'est intéressé à quantifier la flexibilité générale d'un SFPM, en a répertorié et explicité 28 types. Mais, la terminologie n'est pas arrêtée. Ainsi, la flexibilité de gamme, qui caractérise la capacité de fabriquer plusieurs gammes de production, est appelée "process flexibility" par Brown et "job flexibility" par Buzacott. En revanche, le terme "job flexibility" employé par Kusiak diffère grandement de la flexibilité de gamme. Nous sommes amenés à préciser les types de flexibilité, considérés comme particulièrement significatifs pour la suite de notre étude. La Figure I-2 résume ces types de flexibilité ainsi que les possibles implications entre ces différents types.

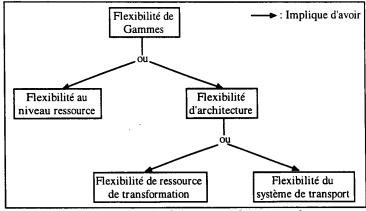


Figure 1-2: Types de flexibilités considérés et implications

CHAPITRE I : Contexte de l'étude

1.2.2.1 Flexibilité de gammes

La flexibilité de gammes exprime la capacité de fabriquer simultanément des produits différents avec des flux variables. Celle-ci nous permet de distinguer trois types de SFPM, qui sont classés du "moins" flexible au "plus" flexible.

- Le FLOW SHOP peut s'illustrer par une ligne de production de véhicules automobiles. Les postes de travail sont placés les uns à la suite des autres. Par exemple, la carrosserie passe par un poste de soudage puis on lui pose un parebrise. Le produit est unique et passe d'un poste à l'autre dans un ordre fixe. Il n'y a aucune flexibilité dans les opérations et les produits. Le flow shop permet la fabrication d'un seul type de produits avec tout de même quelques variantes, dans la mesure où le produit subit des opérations identiques ; ce cas peut se traduire par la pose d'un pare-brise teinté.
- Le JOB SHOP offre la possibilité de fabriquer des produits différents en quantité variable. Par exemple, on choisit de fabriquer m₁ produits de type 1 et m_n produits de type n. Le job shop admet une flexibilité dans les produits, mais pas dans la séquence des fonctions de transformation à réaliser afin d'obtenir le produit fini.
- L'OPEN SHOP permet de fabriquer différents produits et autorise diverses séquences des fonctions au niveau des gammes de fabrication (cette dernière est appelée flexibilité de processus de fabrication). Par exemple, des fonctions de tournage et de fraisage peuvent être réalisées dans un ordre indifférent. L'open shop, comme le job shop, implique un parallélisme de flux qui induira des indéterminismes directionnels et d'allocation de ressources.

La flexibilité de gammes nécessite deux autres types de flexibilité : flexibilité au niveau ressource et flexibilité d'architecture.

1.2.2.2 Flexibilité au niveau ressource

La flexibilité au niveau ressource ou flexibilité de machine concerne les ressources de transformation, c'est-à-dire les ressources qui transforment les pièces brutes ou semi-finies afin d'obtenir le produit fini. Elles sont composées des ressources d'usinage et des ressources d'assemblage. On les oppose aux ressources de transfert.

Ce type de flexibilité caractérise la capacité d'une machine à changer d'outil et de programme de commande pour passer d'une opération à une autre [BRO 85]. Cette flexibilité est réalisable dans le cas de machines de transformation dites polyvalentes ; par exemple un centre d'usinage qui pourra réaliser diverses opérations de perçage sur une pièce et de fraisage

sur d'autres. Elle pourra faire intervenir du téléchargement de programmes de commande selon la capacité mémoire de la machine.

1.2.2.3 Flexibilité d'architecture

La flexibilité d'architecture fait intervenir le nombre, la nature et l'agencement des ressources du système de production. Elle se décompose en flexibilité de ressources de transformation et flexibilité du système de transport.

La flexibilité de ressource de transformation se traduit par une redondance d'une ou plusieurs ressources de transformation. C'est l'exemple de deux machines d'usinage réalisant la même opération. Nous avons plus qu'une simple redondance sélective comme c'est le cas pour les systèmes continus. En effet, nous avons la possibilité, soit d'orienter le flux des pièces à usiner sur une seule machine (redondance passive), soit de partager ce flux entre les machines sans forcément être au maximum de la charge de chacune d'elles (redondance active).

La flexibilité du système de transport (convoyeur, robot de chargement/déchargement, chariot filoguidé...) ou flexibilité de routage caractérise la possibilité d'acheminer un produit d'un point à un autre en suivant des trajets différents. Cette flexibilité peut apparaître dans le cas d'une redondance de ressources de chargement qui réalisent la même opération de transfert. Elle peut aussi être induite par des ressources de transfert complexe, du type convoyeur, qui permettent d'atteindre un même emplacement par plusieurs itinéraires.

1.3 Définition et caractéristiques des SFPM étudiés

1.3.1 Définition

Les premiers SAP datent des années 60. Il faut noter que leur développement a été grandement facilité par l'arrivée de l'informatique. La Figure I-3 montre de façon schématique un SAP.

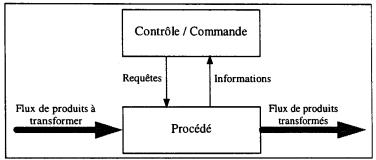


Figure I-3 : Schéma de principe d'un système automatisé de production

La catégorie de SFPM qui nous intéresse est "un atelier automatisé et intégré, composé d'un ensemble de machines-outils à commande numérique munies d'une gestion d'outils

automatisée. Il dispose de systèmes de métrologie et d'assurance qualité. Les composants de l'atelier sont reliés par un système de manutention automatisé et l'ensemble est commandé, contrôlé et surveillé par un système informatique" [SCH 89]. A cette définition, qui prônait idéalement l'automatisation complète, nous intégrons l'homme, qu'il soit opérateur de gestion ou qu'il participe à des tâches de production. En effet, il ne semble pas toujours utile de vouloir tout automatiser, en particulier pour certaines tâches, non réactives, de diagnostic et de recouvrement d'erreur. Grâce à ses capacités d'anticipation, de prise de décision et d'adaptation, l'homme reste un des meilleurs moyens de réaction face à certains types de défaillances. La coopération homme/machine reste ainsi une composante importante des SFPM [MIL 88], [MIL 96].

1.3.2 Caractéristiques principales

Comme indiqué par la Figure I-4, les SFPM parviennent à rester flexibles tout en acceptant des cadences de production élevées. Pour cela, ils allient, à la flexibilité de leurs équipements, un degré élevé d'automatisation, et des stratégies de commande variées, ce qui en fait des systèmes complexes.

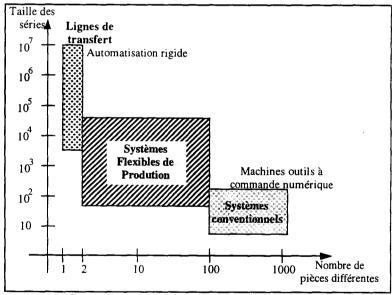


Figure 1-4: Flexibilité et Productivité [BAR 92]

1.3.3 Complexité

Comme mentionné précédemment, de tels systèmes s'avèrent très complexes du fait de l'hétérogénéité des équipements qu'ils englobent, des flexibilités qu'ils offrent, et de la multitude de paramètres à contrôler. Pour un SFPM plutôt dédié à un type de production (variété de pièces peu importante, faible taille des lots) le nombre de paramètres à gérer sera moins important que pour un SFPM qui sera proche d'un open shop.

La complexité dépend aussi des missions à prendre en compte et des contraintes liées au

contexte économique. Un changement de mentalités est apparu : l'apparition d'avaries au cours de l'exploitation du SFPM est devenue une certitude. Un système performant uniquement en mode normal n'est plus entièrement satisfaisant. L'objectif est, maintenant, d'avoir un système qui reste en partie disponible en cas de panne. Pour le concepteur, un moyen d'atteindre cet objectif est d'automatiser tout ou une partie du SFPM et, de non seulement concevoir la commande du SFPM en mode de marche normale, mais aussi d'analyser l'ensemble des potentialités (induites par les flexibilités) du système, afin d'assurer une production en présence de perturbations.

Ces problèmes de décision élémentaire peuvent être groupés en problèmes relatifs à la conception (sélection des équipements, agencement, structure du système de transport...) et en problèmes liés à l'exploitation (détermination des ratios de production, allocation des ressources, choix des chemins empruntés dans l'architecture, ...) [GUN 95].

2. Automatisation des SFPM : intégration, supervision

Cette section présente les implications de l'automatisation des SFPM, notamment la nécessité d'avoir une démarche complète et intégrée. Les développements autour du concept d'intégration sont abordés. Ils permettent de situer clairement l'automatisation des SFPM dans une démarche d'intégration. Quelques méthodologies globales ainsi que d'autres de type exécutif sont ensuite présentées.

2.1 Evolution de l'automatisation

Si l'on se réfère à la définition du Larousse, l'automatisation consiste en l'exécution automatique de tâches industrielles sans intervention humaine intermédiaire.

Concernant les SFPM composés d'un nombre important d'équipements en interaction, l'automatisation fait de plus en plus appel à une démarche intégrée. Celle ci, souvent appelée ingénierie simultanée (ou concurrent engineering), nécessite à la fois une vision globale, et locale, tout en acceptant divers points de vue, du système à automatiser [STA 94].

Pour s'affranchir d'une partie de leur complexité, les SFPM sont abordés de façon modulaire. Ces modules peuvent être autonomes et interagir avec les autres selon leurs besoins (on s'oriente alors vers les structures multi-agents). La nécessité d'une vision globale implique que ces modules doivent être structurés selon une organisation bien souvent hiérarchique.

CHAPITRE I : Contexte de l'étude

L'approche selon divers points de vue implique d'intégrer l'automatisation dans une vision système intéressant l'entreprise à tous les niveaux. Elle permet de déterminer plusieurs types de fonctionnalités intrinsèques au système automatisé.

- Le premier type concerne la mission du SFPM. Le SFPM se voit confier un certain nombre de fonctions répondant aux besoins des utilisateurs, appelés services. Ces services sont ensuite déclinés sur des ensembles de ressources du SFPM. Un ensemble d'équipements sera caractérisé par les services que l'on attend. Ce service peut être exprimé en termes de quantité et de qualité de produits fabriqués. La traduction de ces services au niveau du processus d'automatisation aboutit à la conduite des éléments du SFPM.
- Le second type ne considère plus seulement un ensemble de services élémentaires délivrés par les équipements du SFPM, mais une coopération de ces services, qui se traduit en termes d'objectifs de production, afin d'assurer au mieux la mission globale du SFPM. Le passage d'une simple conduite à des préoccupations relatives à l'organisation du SFPM et à son impact sur l'extérieur amène à considérer également des fonctionnalités d'aide à la gestion, aide au diagnostic, aide à la maintenance, ... L'automatisation ne fait plus seulement intervenir la conduite en vue de produire, mais aussi le contrôle de cette finalité de production. Le système devient intelligent.
- La poursuite de ce raisonnement amène à élargir les aspects de l'automatisation des SFPM et en considérant les SFPM tout au long de leur cycle de vie (installation, réglage, exploitation, démantèlement) [WIL 94], [AMI 92], [HAN 96].

L'automatisation intégrée peut donc devenir très complexe et pas uniquement du fait de la taille du SFPM. Dans la suite nous ne nous intéresserons qu'à l'exploitation sûre des SFPM et à la conception des SFPM en vue de leur exploitation sûre. Le deuxième point de vue sera celui principalement considéré.

Actuellement, de nombreux projets d'automatisation font appel à la méthodologie CIM (Computer Integrated Manufacturing). Une méthodologie se définit comme l'étude et la mise en oeuvre d'un ensemble de méthodes utilisées conjointement [LES 94]. Une méthodologie CIM nécessite l'utilisation d'un cadre de référence ou architecture de référence, de formalismes de modélisation et de concepts mettant en oeuvre une démarche structurée de modélisation.

2.2 CIM et ses concepts

Le concept de CIM fut tout d'abord introduit par Harrington [HAR 73]. Il peut être résumé par l'intégration de tous les services de l'entreprise, de l'étude de marché à la distribution du produit, en passant par les aspects économiques, d'ingénierie de production et de gestion de l'information.

Au départ, CIM a considéré l'intégration de la production comme une priorité; les autres services étant liés à la production, ils étaient implicitement intégrés. Dans ce cas, trois principaux éléments ont été considérés :

- les processus de fabrication contrôlés par ordinateurs ;
- la planification de ces processus ;
- la gestion de production et le contrôle des approvisionnements.

Puis des extensions de ce concept ont été proposées : CIE (Computer Integrated Enterprise), CIME (Computer Integrated Manufacturing Enterprise), etc... En fait, le concept d'**intégration totale** de l'entreprise a été traduit, en 1985, par le diagramme en roue (CIM Wheel) de la Society of Manufacturing Engineers (cf. Figure I-5).

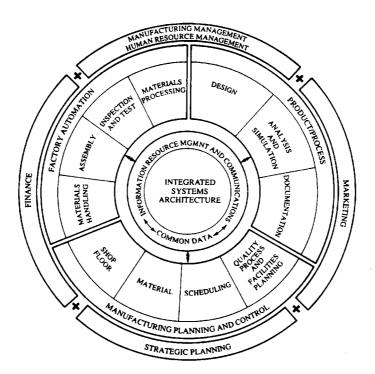


Figure I-5: Diagramme en roue CIM

Ce schéma liste 21 aspects des différentes activités d'une entreprise et en montre les interconnexions. Le point central est l'architecture du système intégré et la gestion de

CHAPITRE I : Contexte de l'étude

l'information. Cette approche systémique de l'entreprise montre la nécessité d'une organisation permettant d'intégrer tous les services énoncés plus haut.

Un autre intérêt de ce schéma est de rompre avec la traditionnelle décomposition de l'entreprise en départements, qui entraînait un cloisonnement des services. Ceci ne veut pas dire qu'une décomposition n'est pas nécessaire. Elle est même indispensable du fait de la complexité du système à étudier. Mais cette nouvelle vision tend à faire admettre que les liens hiérarchiques ne sont plus les seuls vecteurs d'information. Des liens d'information transversaux sont ainsi établis ou implicitement considérés.

L'autre aspect de CIM est l'intégration par niveau. Ce dernier découle d'ailleurs du concept d'intégration totale détaillé ci-dessus. Alors que la productique s'attache principalement à réaliser une intégration horizontale (groupement de ressources...), CIM vise une intégration verticale. Cette dernière est assurée par l'introduction de systèmes de gestion de bases de données et de réseaux locaux industriels. Par exemple, le service marketing pourra venir chercher les gammes éditées par le bureau méthode en FAO (Fabrication Assistée par Ordinateur), afin d'apporter une réponse technico-commerciale au client. A ce titre, nous citons le projet ADCOM (Advanced Configuration Management System) de l'AIT (Advanced Information Technology), qui vise à définir, développer et mettre en oeuvre un processus générique permettant de gérer les données d'un produit partagées dans toute l'entreprise [SHA 98].

L'engouement pour CIM a été fulgurant. Mais de nombreuses entreprises, n'ayant pas osé changer en profondeur leur organisation, n'ont pas eu les retours sur investissement escomptés. En fait, CIM doit être appliqué à tous les secteurs de l'entreprise et ne doit pas se contenter d'une juxtaposition de solutions technologiques donnant lieu à des îlots d'automatisation. Il n'empêche que CIM continue à intéresser les entreprises et est actuellement vu par elles comme une clé dans la recherche de compétitivité en cette fin du XXème siècle.

Pratiquement, CIM regroupe un ensemble de méthodes conçues pour intégrer données et informations des différents secteurs d'activité d'une entreprise. Cette intégration considère l'entreprise de façon bien plus large qu'une simple unité de production. Les avantages sont les suivants ¡HAN 96]:

• Au niveau humain, cette intégration facilite la prise de décision, réduit les délais et améliore la communication car elle décloisonne l'information;

CHAPITRE I : Contex l'étud

• Au niveau de la production, CIM offre un meilleur contrôle des équipements automatisés.

L'approche CIM a donné lieu à des travaux concernant des méthodologies, qui visent à implanter ces concepts.

2.3 Les méthodologies CIM

Les méthodologies CIM ont pour objet de traiter, de la spécification à la réalisation, un ou plusieurs aspects du système (informationnel, décisionnel, opérationnel) en combinant différentes méthodes et formalismes. Pour cela, elles peuvent s'appuyer sur des architectures CIM.

Une architecture CIM comprend un ensemble de modèles qui représentent les différents aspects d'un système CIM [DOU 90]. L'architecture peut être vue comme un cadre pour la conception, l'analyse et l'implantation des systèmes manufacturiers complexes, et fournit des modèles qui pourront être utilisés pour ces objectifs. L'utilisation d'une architecture de référence aide grandement le projet d'automatisation. Elle va permettre d'appliquer la méthodologie et de vérifier le bon déroulement du projet [WIL 94].

2.3.1 Les différentes approches

Deux types de méthodologies sont dénombrés :

- 1. Les méthodologies globales s'intéressent au développement et à la mise en oeuvre d'un projet global comme un programme de production, d'intégration ou de développement. Ces approches adoptent une démarche plutôt descendante dans ce sens qu'elles partent de fonctions stratégiques (de gestion globale) pour élaborer des décisions plus tactiques et s'intéresser à l'aspect opérationnel. Trois principales méthodologies de ce type sont recensées :
 - La méthodologie intégrée **GRAI**, développée au laboratoire GRAI de Bordeaux [DOU 92];
 - La méthodologie **Purdue**, développée à l'université Purdue (USA) [WIL 92];
 - La méthodologie CIMOSA, développée, dans le cadre de projets européens ESPRIT par le consortium AMICE [AMI 93].
- 2. Les méthodologies de type exécutif s'intéressent au système opérationnel avec un souci d'intégration des points de vue, comme la commande, le contrôle, la maintenance, la gestion du SFPM. Ce type d'approche est systémique, orienté vers les

fonctions plutôt exécutives de l'entreprise. De nombreux travaux à propos des méthodologies CIM ont été réalisés à partir de cette approche. Ils ont abouti à la définition de méthodes et de hiérarchies de représentation des fonctions de l'entreprise. Nous citons quelques exemples :

- ICAM (Integrated Computer Aided Manufacturing) est un projet développé par l'USAF (United States Air Force) qui a donné lieu à la définition de IDEF (Icam DEFinition) [SAV 85], [DON 97];
- Le modèle présenté par le **NIST** (National Institute of Standards and Technology) permet de représenter un système de production en cinq niveaux (cf. Figure I-6). Chaque niveau correspond à un niveau d'abstraction, donc de détail et à une partie de l'entreprise [BAR 92]. Ce modèle est très utilisé si bien qu'il est couramment nommé "pyramide CIM".

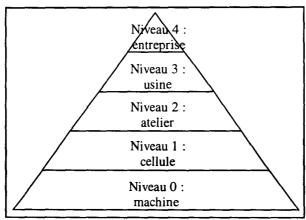


Figure I-6: Pyramide CIM

Le lecteur trouvera en annexe I, une description de ces méthodologies. Toutes ces méthodologies n'ont pas pour objectif de décrire un système avec une seule méthode. Des travaux portent sur l'utilisation de plusieurs méthodes (SADT, réseaux de Petri, MERISE, objet, ...) dans le cadre d'une méthodologie. Nous pouvons, citer par exemple, l'adaptation des méthodes fonctionnelles (SADT, SA-RT, ...) et objet (HOOD, OMT, ...) issues du génie logiciel à l'ingénierie des SFPM [LHO 94], [LES 94], [ZAY 97].

2.3.2 Le projet CASPAIM

Nous développons maintenant la méthodologie CASPAIM (Conception Assistée des Systèmes de Production Automatisés de l'Industrie Manufacturière), thème fédérateur des travaux actuels de l'équipe PFM du LAIL. Cette dernière constitue le cadre général des travaux présentés dans ce mémoire.

Le projet CASPAIM vise à définir une méthodologie de conception concernant l'activité de production de façon à aboutir à une organisation des modélisations et une implantation universelles. Dans ce sens, il s'inscrit dans une démarche intégrée de type exécutif et ne se contente pas d'interfacer des entités indépendantes (îlots d'automatisation).

Initialement, ce projet couvrait uniquement l'aspect commande en utilisant principalement le formalisme réseau de Petri (RdP) [MUR 89]. L'objectif était d'automatiser ou d'assister le processus complet de conception d'un système de commande performant, depuis la définition du cahier des charges jusqu'à son implantation. Il s'est ensuite orienté vers la conception des autres composantes du SFPM. L'approche systémique, orientée par les données, englobe maintenant de nombreux points de vue tels que la conception du produit, la définition de la commande, l'exploitation sûre, ...

Le SFPM est décomposé en partie procédé, partie commande et niveau hiérarchique [CRA 89]. La partie commande est elle même scindée en Suivi des Gammes Opératoires et Gestionnaire de Ressources (cf. Figure I-7). Les différentes fonctions de la partie commande ont été réparties entre ces deux modules. Le Suivi des Gammes Opératoires est chargé d'assurer le contrôle du séquencement des tâches au niveau de chaque gamme de fabrication considérée isolement. Le Gestionnaire de Ressources gère effectivement la commande des moyens de production. Des modules de surveillance, de gestion des modes ont ensuite été intégrés à cette commande.

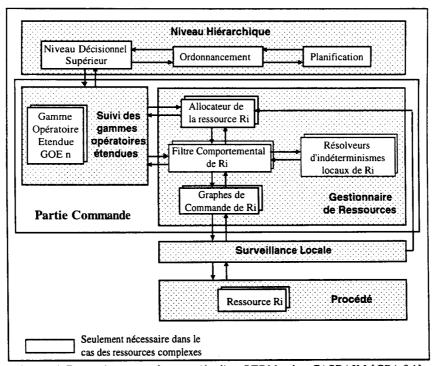


Figure 1-7: Architecture de contrôle d'un SFPM selon CASPAIM [CRA 94]

2.3.2.1 Démarche de conception de la commande

L'approche selon des objectifs systèmes d'une part et produits d'autre part a permis d'aborder le SFPM non plus seulement selon le point de vue fonctionnel, mais aussi selon le point de vue opérationnel, c'est à dire en analysant et intégrant la structure, les caractéristiques et les contraintes liées aux différents moyens de production, que nous nommerons ressources.

Les principes de la démarche CASPAIM sont présentés par la Figure I-8. Seuls les concepts utilisés par la suite, qui permettront de situer notre travail, sont abordés. Le lecteur intéressé par la démarche détaillée se référera à l'annexe II.

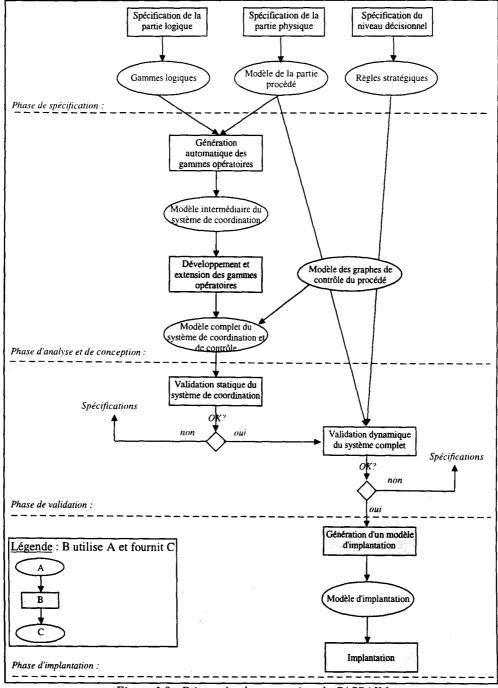


Figure I-8 : Démarche de conception de CASPAIM

La Spécification de la partie logique permet de décrire les produits à fabriquer par le SFPM par leur Gamme Logique [CRU 91], sans tenir compte de la nature des équipements à utiliser. Une gamme logique (GL) d'un produit représente la séquence des différentes fonctions de transformation (usinage, assemblage) que le SFPM doit réaliser, afin d'obtenir le produit fini à partir de son état brut. La flexibilité de gamme est prise en compte à ce niveau.

La **Spécification de la partie physique** aboutit à la description des différentes ressources de production (transformation, transport, stockage, ...), ainsi qu'à leur organisation en terme d'agencement, d'accessibilité et de contraintes.

La **Spécification du niveau décisionnel** aboutit à la définition de règles stratégiques qui permettront de résoudre les conflits et indéterminismes d'affectation [OHL 94], [CAM 97], et de routage [HAM 91], [TAW 95].

Durant la phase **d'analyse et de conception**, les **Gammes Opératoires** (GO) sont générées. Une Gamme Opératoire est représentée grâce au formalisme RdP, et décrit, pour un type de produit, le parcours de celui-ci au sein du SFPM. En fait, les GL sont étendues en tenant compte des ressources de transformation et de l'aspect transitique de la partie physique [AMA 94]. Ces Gammes Opératoires constituent un modèle pour la partie coordination de la commande. Elles sont non déterministes car elles prennent en compte les flexibilités de gamme, de ressource, et d'architecture.

La phase de **validation** repose sur l'analyse de "bonnes propriétés" du modèle RdP (vivacité, RdP borné, ...) et sur la simulation [AUS 94]. **L'implantation** de la commande est basée sur une transposition des modèles en langage ADA [HUV 94]. Les autres modules venant se greffer à la commande font l'objet d'implantations spécifiques [TOG 92], [ELK 93], [BOI 91], [KER 96].

2.3.2.2 Bilan

2.3.2.2.1 Limites

L'association des outils et méthodes, brièvement présentés, permet d'aboutir à la définition de modèles décrivant le contrôle/commande du SFPM. La poursuite des travaux, prenant en compte les problèmes liés à l'exploitation sûre du SFPM, ont abouti à développer des modules de surveillance [TOG 92], [ELK 93] et de gestion des modes [BOI 91], [KER 96]. Les modèles élaborés adoptent des décompositions et des **structurations propres** du fait de la spécificité des points de vue.

CHAPITRE I: Contexte de l'étude

La conception de ces modèles a été réalisée conjointement à celle de la commande de façon à minimiser les risques et les coûts. On peut regretter que cette intégration des différents modules, ajoutés au sein de la partie tactique, se soit principalement réalisée avec la commande et particulièrement avec le Suivi des Gammes Opératoires. La démarche a abouti à une vision du type de la Figure I-9, qui montre que les travaux ont été centrés principalement sur une association forte avec la commande.

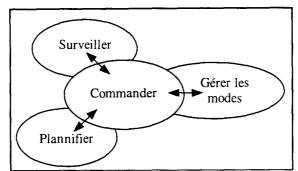


Figure 1-9: Intégration principalement centrée sur la commande

Cette **intégration sélective** s'est ressentie au niveau du processus de conception : La conception de chaque module est réalisée relativement indépendamment des autres modules. La validation n'est réalisée qu'avec la commande. Il n'y a aucune intégration directe des différentes activités tactiques les unes avec les autres. Il résulte que les rôles alloués à chaque module n'ont pas été clairement définis si ce n'est par rapport à la commande. On note en effet des recoupements entre Gestion des Modes, Recouvrement et Pilotage tels qu'ils ont pu être spécifiés dans [KER 96], [TAW 95] et [TOG 92].

2.3.2.2.2 Evolution : de l'interface à la supervision

Le projet a montré l'intérêt de décomposer la commande. Ainsi une partie de la commande reste non déterministe (contrôle élémentaire des séquencements) alors qu'une autre, stratégique (la majeure partie du niveau hiérarchique), s'intéresse à la prise des décisions. L'intérêt d'une commande non déterministe réside dans la prise en compte de l'ensemble des flexibilités d'architecture et de gamme du SFPM. D'autres modules plus tactiques, notamment l'allocateur, s'intéressent à la gestion et à l'application des décisions (cf. Figure I-10).

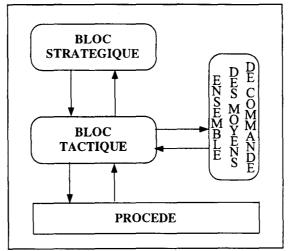


Figure I-10: Intégration d'un contrôle tactique

Cette partie tactique a été nommée Interface [CRU 91], [BOU 93]. Son rôle est de coordonner les différentes ressources à partir des commandes transmises par le Suivi des Gammes Opératoires. Il s'agit notamment de gérer l'allocation des emplacements physiques des ressources du point de vue des produits, d'élaborer des commandes fines valides en respectant une stratégie de fonctionnement, de traiter des informations issues des capteurs, ...

La poursuite des travaux, prenant en compte les problèmes liés à l'exploitation sûre du SFPM, ont abouti à développer cette interface et à y greffer des modules de surveillance et de gestion des modes. Bien que ces travaux touchent certains aspects de la supervision, le concept de supervision n'a pas été abordé dans son ensemble. Il convient donc d'introduire et de développer le concept de supervision dans CASPAIM. L'objectif de cette transition entre interface et supervision est d'aboutir à une intégration plus complète des travaux menés dans le contexte de la méthodologie CASPAIM.

La démarche, présentée au chapitre II, propose d'intégrer ces travaux autour du concept de supervision et montre comment ils sont organisés dans ce module tactique de supervision.

2.3.3 Conclusion

Du fait de leur complexité et du haut degré d'automatisation requis, les SFPM sont particulièrement bien adaptés à l'utilisation de méthodologies CIM dans les cas suivants :

- Spécification du SFPM: fournir un cadre dans lequel les activités et les composants sont identifiés ainsi que leurs relations;
- Etude du cycle de vie : montrer quelles activités sont nécessaires au cours des phases du cycle de vie du SFPM ;

• Analyse du SFPM: Les fonctionnalités du SFPM sont représentées à l'aide d'un ou de plusieurs modèles, qui peuvent être utilisés afin de réaliser des simulations et des analyses à différents niveaux de détail;

• Contrôle/Commande du SFPM : Les modèles traduisant la logique du procédé peuvent être utilisés afin de contrôler le SFPM.

Actuellement, les méthodes de conception adoptent une approche systémique. L'intégration utilisée dans ce contexte s'avère donc extrêmement intéressante. Mais, étant donné la diversité des travaux sur ce sujet, un effort de standardisation serait le bienvenu. De plus, la définition d'une architecture de référence sur laquelle on pourra calquer des méthodes de conception et d'analyse reste un point extrêmement délicat.

Concernant le projet CASPAIM, nous avons montré que l'intégration des différents travaux était plutôt sélective, centrée sur la commande. Or, une orientation purement commande ne suffit plus dans le contexte actuel des SFPM. Il faut aussi contrôler la finalité de production du système. Ce dernier n'est en effet pas sans failles et n'évolue pas dans un environnement parfait. Ce contrôle de la finalité de production du SFPM passe par le développement de la supervision. L'intégration, nécessitant d'élargir le point de vue, passe donc par l'introduction du concept de supervision. Le développement de ce dernier s'avère être une partie importante au sein du processus de conception.

3. La supervision des SFPM

Pour les entreprises, les enjeux actuels et à venir tournent autour de la résolution des problèmes liés à l'optimisation du SFPM, à la gestion de l'information et à l'organisation [WAR 95]. L'intégration, fer de lance des méthodologies présentées, nécessite d'avoir recours à une solution globale qui sera mise en oeuvre dans une démarche autour du concept de supervision.

Après une définition générale de la supervision, cette section présente les différentes approches en matière de surveillance / supervision. La diversité des travaux montre que l'aspect supervision peut être abordé selon différentes sensibilités.

3.1 Définition de la supervision

Initialement, la supervision avait un rôle plutôt passif. Elle permet [NAJ 94] :

• de visualiser les différents états du système de fabrication à l'aide de synoptiques logiciels ;

- de prendre en compte les commandes de l'opérateur ;
- d'afficher les messages afin d'aider l'opérateur à prendre une décision.

Ainsi défini, le superviseur sert principalement d'interface avec l'opérateur de supervision.

De ce fait, les superviseurs industriels (PANORAMA, INTOUCH, PCVUE32, ...) ont beaucoup développé ces fonctions graphiques permettant de représenter le procédé, et de signaler les alarmes. L'évolution autour de l'automatisation des SFPM a entraîné des changements répercutés au niveau des superviseurs. Ces derniers se sont ouverts et acceptent des modules externes (modules paramétrant automatiquement la commande, modules de diagnostic, ...). A titre d'exemple, citons :

- la structure du superviseur PANORAMA, composée d'un module central gérant l'acquisition et l'archivage des données, autour duquel sont implantés des modules d'alarmes, de visualisation des données, de statistiques, ...
- le superviseur INTOUCH, intégré dans une suite logicielle (FACTORY SUIT) dont un module permet de gérer une séquence de fabrication.

Cette orientation des industriels est induite par la vision de la supervision qu'ont les laboratoires de recherche en Productique.

Dans les SFPM, la supervision n'est donc plus perçue comme un simple outil de visualisation de l'état du procédé mais comme un ensemble de fonctions intelligentes nécessitant une coopération homme/machine [MIL 88] incluant une notion de prévision en vue d'éviter un fonctionnement qui s'écarte de la "normale". La supervision est donc active. On rejoint ici le domaine informatique. Le superviseur au niveau du système d'exploitation a pour rôle de contrôler l'enchaînement et la gestion des processus (définition du Larousse). Avec notre approche producticienne, nous définissons les objectifs de la supervision comme suit :

<u>Définition</u>: La supervision s'emploie à réaliser dans les meilleures conditions, le plan de production.

Dans ce sens, elle garantit les objectifs du système de production en fonction des données de la partie Ordonnancement, de la Maintenance, des consignes des opérateurs et empêche les dérives du système commandé. On entend par dérives tout ce qui n'est pas prévu pour un fonctionnement spécifié comme normal (comme les défaillances par exemple). Elle contribue donc à un accroissement de la disponibilité et de la sécurité des moyens de production.

Cette définition, volontairement large, va s'affiner au cours de la présentation des travaux de l'équipe PFM du LAIL. Elle sera complétée dans la section proposant une structuration de la supervision.

La problématique de la supervision est posée par ses contraintes. En effet, afin de répondre aux objectifs de la définition, la supervision doit à la fois être intelligente et réagir en temps réel. Elle doit en effet pouvoir décider, dans le cas du fonctionnement normal du SFPM, des options à prendre lorsqu'un indéterminisme, volontairement non résolu en conception, survient. Le rôle de la supervision est encore plus flagrant dans le cas où un aléa viendrait perturber l'architecture et remettre en cause des données pour la production. Ayant trait au domaine de la tactique, elle devra mettre en oeuvre au plus vite ses solutions afin de répondre aux objectifs de sûreté de fonctionnement. La difficulté vient du fait qu'une fonction intelligente est très difficilement réactive [TOG 92]. Ainsi la supervision sera composée de fonctions qui interviendront sur plusieurs niveaux d'une hiérarchie de représentation du procédé calquée sur des horizons temporels différents.

3.2 Etat de l'art

Les travaux en matière de supervision sont nombreux. Deux grandes approches se distinguent : l'approche basée sur la théorie de Ramadge Wonham et l'approche système.

Cette section n'est pas exhaustive. Elle veut donner une idée des principaux types de contributions en matière de Surveillance / Supervision.

3.2.1 Approches issues de la théorie de la supervision

Nous effectuons tout d'abord quelques rappels concernant la théorie de Ramadge et Wonham (RW), puis nous abordons la mise en oeuvre de cette théorie par les laboratoires français dont le LAG (Laboratoire d'Automatique de Grenoble) et le LAI (Laboratoire d'Automatique Industrielle).

3.2.1.1 Rappels sur la théorie de Ramadge et Wonham

L'objectif de la théorie de la Supervision des Systèmes à Evénements Discrets, élaborée par Ramadge et Wonham, est d'appliquer aux SED des principes analogues à ceux de la théorie de la commande des systèmes continus, tels que des notions d'observabilité et de commandabilité. Elle vise ainsi à donner des éléments de formalisation et de conceptualisation applicables aux SED.

Son principe est basé sur la séparation du fonctionnement du procédé en boucle ouverte et en boucle fermée [RAM 87], [RAM 89], [WON 87]. Il s'appuie aussi sur la caractérisation du

comportement et sur la satisfaction des contraintes en utilisant des techniques faisant appel aux langages formels ainsi qu'aux automates à états (accepteurs, machines de Moore).

L'hypothèse principale est que le procédé à superviser est générateur spontané d'événements [RAM 89], classés en événements contrôlables (Σ_c) et événements non contrôlables (Σ_u). Le rôle du superviseur est d'autoriser ou d'inhiber certains événements contrôlables, de façon à ce que le procédé ne s'éloigne pas des spécifications de fonctionnement (cf. Figure I-11). Le procédé supervisé ne génère donc que des événements qu'il générerait s'il était en boucle ouverte, et qui ne sont pas interdits. Son comportement est ainsi restreint, en boucle fermée, aux séquences d'événements maximales admissibles par rapport au comportement désiré (cf. Figure I-12).

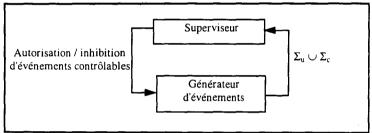


Figure I-11: Modèle de base de la supervision au sens RW

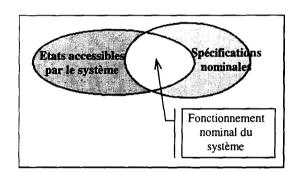


Figure I-12 : Restriction des états accessibles par le système en boucle fermée

Plus précisément, le comportement du procédé en boucle ouverte est décrit par des séquences d'événements, à partir desquelles est défini un langage formel sur l'alphabet des événements. Il faut noter que, dans l'approche RW, le temps n'intervient pas lors de la description. L'analyse est qualitative et seules les notions de précédence et de succession sont prises en compte. D'après les propriétés sur les grammaires, un automate à états finis modélisant le comportement du procédé peut être construit, sous certaines conditions.

Le superviseur est modélisé par un automate à états, dont l'évolution se fait sur occurrence d'un événement du procédé, et dont les sorties associées aux états sont des listes d'événements interdits pour le procédé. Il est synthétisé, sous certaines conditions, à partir de la composition synchrone de l'automate modélisant les spécifications et de l'automate modélisant le procédé, puis par l'inhibition des états défendus [KUM 91]. On entend par états défendus, les états où il

existe une séquence d'événements incontrôlables amenant le procédé dans un état non toléré par les spécifications.

Cette théorie est très complète. Elle formalise analytiquement et utilise des lois mathématiques afin de prouver, a priori, les propriétés du système étudié (comme la contrôlabilité, l'existence du superviseur, ...). Elle permet donc de garantir, a priori, que le fonctionnement du système respectera les spécifications du cahier des charges sans faire appel à la simulation.

Mais elle reste peu exploitée en milieu industriel, peut-être du fait d'une certaine difficulté dans l'utilisation des automates et des langages formels pour modéliser les systèmes complexes [ZAY 97], et aussi de la difficulté d'appliquer les résultats théoriques à un contexte pratique. De plus, la taille de l'automate du superviseur devient vite très importante. Ce problème est en partie réglé par l'utilisation d'approches modulaires et hiérarchiques [ZHO 90].

Dans la pratique, l'hypothèse de générateur spontané d'événements, de même que la connaissance exhaustive des événements nécessitent quelques aménagements. On peut trouver diverses extensions basées sur le concept d'événement forcé [BRA 96], amenant à synthétiser une commande respectant les spécifications.

Les travaux du LAG et du LAI se sont intéressés à aller au-delà de la synthèse d'une simple commande. Le LAG, en dissociant la commande sans contrainte de fonctionnement, de la commande avec contraintes entre ressources, a développé le concept de Commande Supervisée [CHA 95/a]. Le LAI s'est focalisé sur l'assurance d'un fonctionnement sûr malgré l'apparition de défaillances. Ses travaux visent à la mise en place de systèmes développés dans le cadre de la sécurité opérationnelle [NIE 92].

D'autres travaux s'intéressent à la prise en compte de la notion du temps [BRA 94], [GOU 97].

3.2.1.2 La commande supervisée

Cette approche, développée au Laboratoire d'Automatique de Grenoble (LAG), aborde la supervision par l'aspect commande. Elle vise à implanter la théorie de RW en utilisant l'outil Grafcet [DAV 92]. Son principe est fondé sur une séparation entre commande et contrôle des spécifications de fonctionnement par le superviseur. La commande de chaque ressource est considérée indépendamment des autres. Le superviseur traduit certaines contraintes de fonctionnement entre les ressources. Le rôle du superviseur reste identique à celui de RW, mais il est appliqué au procédé étendu constitué du procédé couplé à son système de

commande (cf. Figure I-13) [CHA 96]. Ce procédé étendu est vu comme un générateur spontané d'événements, dont les événements générés par la commande peuvent être considérés comme contrôlables. Le superviseur va restreindre la commande afin que le procédé étendu respecte un certain nombre de spécifications logiques de fonctionnement.

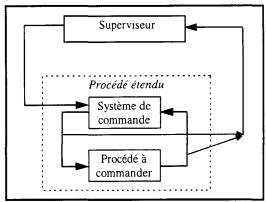


Figure 1-13 : Schéma de commande supervisée

La démarche s'organise autour des étapes suivantes [CHA 95/b], [CHA 96]:

- 1. Elaboration d'un ensemble de Grafcets partiels de commande qui sont supposés inclure les comportements du procédé et représentent le modèle du procédé étendu ;
- 2. Spécification des contraintes de l'application par des Grafcets de Supervision qui servent à figer les actions de commande ;
- 3. Traduction des Grafcets suite à l'introduction des actions de figeage en automates équivalents ;
- 4. Composition de l'automate global à partir de la composition des automates obtenus à l'étape précédente. Cet automate, qui représente le fonctionnement désiré du modèle, permettra de vérifier la commandabilité du système modélisé.

Le procédé n'est donc pas représenté par un modèle explicite mais par son comportement supposé être implicitement intégré au sein du Grafcet de commande. Le système est contrôlable par définition puisque les événements non contrôlables sont connus de la commande (comptes-rendus de la commande).

En revanche, ce modèle unique nécessite un effort de modélisation important puisqu'il considère toutes les interactions entre commande et procédé. Ces interactions doivent être décrites par des événements simples et déterministes (transitions du Grafcet) en excluant l'utilisation de prédicats conditions ou l'injection de données incertaines ou floues.

Il est à noter qu'il n'y a pas à proprement parler de surveillance du procédé. La détection, le diagnostic d'une défaillance ne sont pas considérés. La prise en compte des défaillances pourra

seulement être réalisée au niveau des spécifications de fonctionnement. Par exemple, on précisera de réaliser l'assemblage sur une autre station d'assemblage lorsque la station initialement désignée est arrêtée.

Concernant la détection et le diagnostic, une approche système fondée sur l'utilisation de RdP est en développement au LAG [SIM 98].

3.2.1.3 La sécurité opérationnelle

La sécurité opérationnelle, développée au Laboratoire d'Automatique Industrielle (LAI) de l'INSA de Lyon, a pour objet d'assurer un fonctionnement sûr sous des risques acceptés. Elle entend trouver un compromis entre sécurité et disponibilité en assurant une certaine continuité de fonctionnement au-delà de la gestion des arrêts d'urgence. La démarche consiste à déterminer les causes circonstancielles qui peuvent aboutir à l'accident et à rechercher les actions correctives nécessaires au maintien du service.

Dans ce cadre, l'objectif consiste à assurer un fonctionnement dégradé en cas de défaillance significative, qui est considérée comme une perturbation du régime nominal de fonctionnement. La supervision (telle que nous l'évoquons et la définissons au chapitre II 1.1 du mémoire), appelée ici surveillance, repose sur une structure de compensation permettant de garder opérationnel un site de production, tout en maîtrisant les risques encourus et en respectant une qualité acceptable du produit [NIE 94].

La théorie de la supervision permet d'aborder la synthèse de la commande sûre avec une approche formalisée et de statuer sur des propriétés de contrôlabilité, de blocage, ... Ce formalisme permet ensuite de synthétiser et de vérifier des fonctionnements dégradés imposés (par un relâchement des contraintes de fonctionnement). Pour ce type de fonctionnement dégradé, le concept de contrôlabilité n'est plus suffisant, notamment pour la prise en compte des événements de défaillance. Les techniques développées sont fondées sur la détermination de trajectoires optimales excluant l'accessibilité à des états interdits (cf. Figure I-14). Les défaillances sont ici explicitement prises en compte. Elles sont prévues et modélisées.

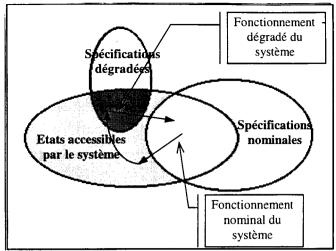


Figure 1-14: Trajectoires admises en compensation

Les travaux proposent l'utilisation d'un observateur et d'un ou plusieurs compensateurs selon la Figure I-15 [NOU 97]. Dans cette figure, S est un superviseur au sens RW. Le module de surveillance permet la prise en compte des défaillances.

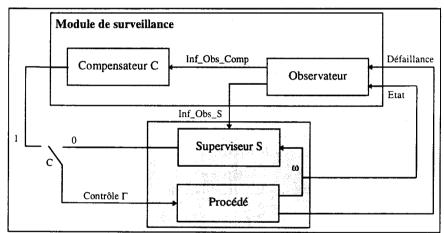


Figure I-15: Utilisation du compensateur

Le rôle de l'observateur est de suivre l'évolution du système d'en détecter les déviations et d'activer le compensateur. Il fournit des informations sur la défaillance et l'état actuel du procédé. Le compensateur C est un superviseur au sens RW, dédié à un type de défaillance, distinct du superviseur S, dédié à la commande nominale. Le rôle de C est de compenser la défaillance apparue (cf. Figure I-16). Les spécifications permettant de tolérer certains états sont uniquement transcrites grâce au compensateur. Lors de la commutation entre S et C, S est figé et C est activé. Le système passe en fonctionnement dégradé. Après reprise, C est mis en veille et S recommence à évoluer.

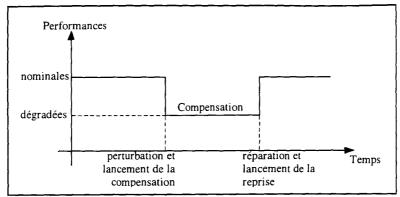


Figure I-16: Principe de compensation

La synthèse du compensateur est réalisée off-ligne. Ses propriétés de commandabilité sont prouvées a priori. Pour un type de défaillance, les décisions concernant les actions à entreprendre sont donc étudiées et arrêtées off-line. Elles aboutissent à la définition du comportement dégradé du SFPM, ainsi qu'à la définition d'une séquence d'états que le système devra suivre afin d'aller du fonctionnement initial au fonctionnement dégradé spécifié (cf. Figure I-14). Ces états n'appartiennent pas forcément au fonctionnement nominal spécifié, mais on vérifie qu'ils restent sûrs, compte tenu de contraintes qui peuvent être relaxées en fonctionnement dégradé. L'état dégradé choisi doit aussi pouvoir être le point de départ d'une séquence de retour vers le fonctionnement nominal initial, permettant la reprise en fonctionnement nominal après réparation de l'élément défaillant.

L'implantation est réalisée en Grafcet [DAV 92]. Le processus consistant à gérer la situation conflictuelle par activation du comparateur et figeage du superviseur nominal est réalisé par des macroactions (figeage, masquage, forçage) [NIE 96].

L'utilisation des approches par automates permet d'étudier la contrôlabilité des spécifications issues d'un relâchement des contraintes de spécification. L'implantation séparée du module de surveillance permet de le mettre en oeuvre sur une commande déjà existante. La limitation d'une telle approche vient principalement du fait qu'elle nécessite d'associer une série d'actions prédéfinies à chaque état de défaillance considéré. Il est donc nécessaire de connaître les situations de dysfonctionnement, qui peuvent être déduites d'une analyse de risques.

3.2.2 Approches systèmes

L'approche système consiste à définir la supervision à partir de ses fonctions. Cette approche est moins formelle que celle de RW. La simulation est souvent utilisée pour valider (et non prouver) les comportements. Un éventail d'outils plus importants, comme les modèles RdP et l'intelligence artificielle, est utilisé.

Différentes équipes se sont intéressées à cette approche en abordant la supervision selon une sensibilité propre. Ainsi les fonctions de la supervision ont été plus ou moins développées.

3.2.2.1 Travaux du CRAN

Les travaux du Centre de Recherche en Automatique de Nancy (CRAN) ont abordé principalement l'aspect surveillance par prévision du comportement. Ils se sont intéressés à la détection des défaillances du procédé et également de celles de la commande.

L'approche est fondée sur la vision moléculaire utilisée pour représenter le comportement normal de la partie opérative [ALA 86]. Cette dernière est vue comme un ensemble d'Eléments de Partie Opérative (EPO). Chaque EPO est modélisé par un graphe état/transition, dans lequel seul le comportement normal est précisé. Le modèle obtenu est utilisé en filtre entre la partie commande (PC) et l'EPO qu'il modélise (cf. Figure I-17). Un tel modèle comportemental permet [LHO 91]:

- d'assurer que les requêtes issues de la PC sont cohérentes vis à vis de l'état courant modélisant le procédé;
- de détecter les défaillances du procédé par comparaison des comptes rendus émanant de la partie opérative avec ceux prévus ;
- de mettre à jour en temps réel des indicateurs de gestion technique, nécessaire à la mise en oeuvre d'une politique de maintenance préventive.

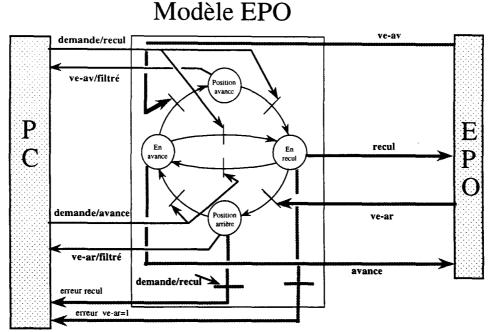


Figure I-17: Modèle EPO d'un vérin hydraulique

L'avantage de l'utilisation de filtre est de réduire de façon significative le temps de détection [SFA 89]. La fonction détection est ainsi séparée de la commande. La poursuite du traitement d'erreur passe par une phase de diagnostic.

Ce type d'approche permet une détection rapide et fine du procédé. Mais il faut s'en donner les moyens, notamment par l'ajout de capteurs rendant compte de l'état de chaque équipement qui pourra alors être vu comme un EPO. De plus, la vision moléculaire n'intègre pas les contraintes qui peuvent régir le fonctionnement de plusieurs EPO coopérant afin de réaliser une tâche. Elle reste localisée au niveau bas du procédé.

Dans un but d'intégration, les travaux actuels visent à associer plusieurs vues (physique, fonctionnelle, comportementale, ...) à chaque EPO et à en étudier la cohérence.

3.2.2.2 Travaux du LAMIH

Les travaux du Laboratoire d'Automatique et de Mécanique Industrielles et Humaines (LAMIH), situé à Valenciennes, se sont intéressés à l'aspect modes d'exploitation et reconfiguration du SFPM. Cette dernière intervient après occurrence d'une défaillance et est vue comme un ensemble de modification du comportement et des modes de marche des entités du SAP afin que ce dernier maintienne les performances souhaitées [MAB 96]. Ces travaux sont fondés sur le Modèle d'Exploitation des Systèmes Automatisés de Production (MESAP) [PAR 92]. Ce modèle réside en une décomposition structurelle mettant en évidence des niveaux d'abstractions tels que le niveau flux de pièces, le niveau composant et les niveaux application (cf. Figure I-18). Les niveaux composant et application sont eux-même décomposés en unités fonctionnelles décrivant les différents modes d'exploitation d'une partie du niveau.

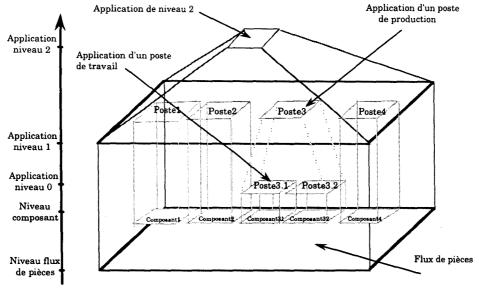


Figure I-18 : Exemple de modélisation basé sur le MESAP

Le MESAP est complété par un modèle prenant en compte les contraintes entre entités et permettant d'aider l'opérateur dans la phase de reconfiguration.

Le processus de reconfiguration est scindé en deux niveaux. Le premier, stratégique, décide d'une modification du flux de produits au sein des différentes entités du SFPM et d'une modification des modes de fonctionnement et d'exploitation des ressources [RAM 96]. Le second niveau, tactique, a pour rôle d'assurer la transition de l'état actuel à l'état objectif (cf. Figure I-19).

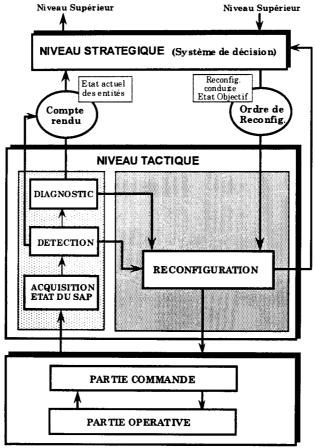


Figure I-19: Processus d'élaboration de la reconfiguration

L'étude des types de réaction a été abordée par la caractérisation des modes d'exploitation et de fonctionnement des ressources d'usinage du SFPM [ROJ 95]. La définition des solutions repose sur des stratégies à court terme, utilisant le mode dégradé ou la réparation de la ressource défaillante, et sur des stratégies à moyen terme par reconfiguration du SFPM. La décision est fondée à la fois sur une évaluation du temps nécessaire à l'élaboration des solutions ainsi que sur une estimation du temps de production [RAM 96].

Pour la reconfiguration, l'approche par scénarii est utilisée. Une procédure détermine quels sont les états intermédiaires par lesquels il faut transiter pour positionner le système de l'état actuel vers l'état objectif fixé (cf. Figure I-20). Un état intermédiaire est un état stable de modes prédéfinis à partir desquels une reprise, même manuelle, est possible. La démarche se

décompose en trois étapes [MAB 96]. La première étape spécifie les états de modes de fonctionnement. L'objectif de la deuxième étape est de spécifier les contraintes entre ces états ; les états incompatibles sont alors éliminés. La dernière étape spécifie les scénarii de reconfiguration.

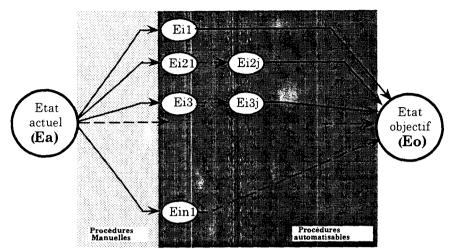


Figure I-20: Concept de reconfiguration

Une autre équipe s'intéresse à l'intégration de l'opérateur humain comme opérateur de supervision des SFPM. Celle-ci passe par une analyse du système homme/machine aboutissant à une coopération verticale homme/machine. Le principe vise à répartir dynamiquement les tâches de décision entre calculateurs et opérateurs humains [MIL 96]. L'étude porte aussi sur la définition d'interfaces homme/machine qui puissent répondre aux besoins informationnels entre les deux parties. L'information est présentée à l'opérateur humain de façon à ce que celui-ci puisse accomplir sa tâche de décision. Afin d'éviter une saturation, les données sont filtrées en utilisant un principe fondé sur le raisonnement flou. Elles sont représentées en utilisant le concept de Mass Data Display pour les vues de détection et de graphe causal pour le diagnostic [LAM 97].

3.2.2.3 Travaux du LAAS

Les travaux du Laboratoire d'Analyse et d'Architecture des Systèmes (LAAS) ont abordé la supervision par l'aspect surveillance. Ce terme a ensuite été élargi à la surveillance active. Vu ses objectifs, il peut être considéré comme ayant trait aux fonctionnalités de la supervision. Les derniers travaux concernent le développement d'une architecture intégrant commande et surveillance active [ZAM 97].

Les fonctions allouées à la surveillance active sont les suivantes :

 la fonction de détection consiste à détecter toute déviation du système commandé par rapport à celui prévu par la commande [SAH 87], [COM 91];

- le diagnostic identifie la cause ou l'origine de la défaillance ;
- la décision et la reprise remettent le système surveillé dans un fonctionnement normal par rapport à la commande ou au procédé [BON 93];
- la fonction de suivi recueille l'ensemble des informations émanant du procédé afin de maintenir une image fidèle du système commandé;
- la fonction d'urgence permet d'appliquer des procédures prédéfinies et prioritaires en cas de danger [COM 91].

La structuration adoptée est modulaire et arborescente. Chaque noeud de surveillancecommande comporte les éléments suivants (cf. Figure I-21) :

- Le bloc modèle de référence pour la surveillance-commande représente l'ensemble des possibilités d'un point de vue surveillance-commande de la partie du système associée au module;
- Le bloc stratégies de surveillance-commande impose une utilisation particulière des activités proposées dans le modèle de référence ;
- Le bloc acquisition et orientation de l'information;
- L'ensemble des fonctions de surveillance-commande est chargé de traiter les informations qui leur sont allouées (détection, diagnostic, décision, reprise, suivi, urgence, et commande);

Dans cette approche, le système constitué des trois premiers blocs est appelé superviseur. Ce système est chargé d'orienter les informations qui transitent par le module vers la ou les fonctions de surveillance-commande aptes à les prendre en compte [ZAM 97].

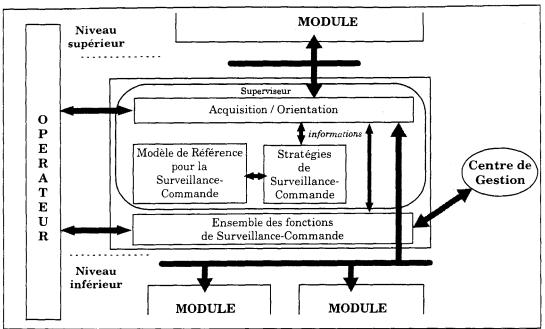


Figure 1-21: Structure d'un module de surveillance-commande

L'approche développée est mixte. La détection est intégrée à la commande. Elle s'appuie sur la notion d'activité, de pré-conditions et de post-conditions (cf. Figure I-22). Elle est fondée sur l'utilisation conjointe du modèle de la commande et du modèle de référence. Le modèle de la commande gère le séquencement des activités sans tenir compte des contraintes inhérentes aux moyens de production. Le modèle de référence rend compte des comportements normaux du procédé. Les contraintes structurelles et matérielles y sont représentées. Ce modèle permet à la commande de vérifier, avant l'envoi d'une requête, que toutes les conditions d'exécutionn de l'activité sont réunies. Si c'est le cas, aucune erreur de commande n'est détectée et la requête est émise. L'activité est lancée. La partie commande se met alors en attente du compte rendu d'exécution de la requête. Si le compte rendu arrive dans la fenêtre temporelle qui lui a été allouée, la partie commande et le modèle de référence évoluent simultanément. Dans le cas contraire, un symptôme de défaillance est détecté et deux options sont considérées :

- le modèle de référence peut évoluer, garantissant une image exacte de l'état du procédé;
- le modèle de référence n'évolue pas, ce qui traduit le viol d'une contrainte de fonctionnement du procédé;

Pour ce type de surveillance des activités, seules les évolutions normales du procédé sont à considérer pour la conception de la commande. Celles qui ne pourront être prises en compte par la commande seront considérées comme anormales. Les modèles de commande et référence sont développés en RdP Objet.

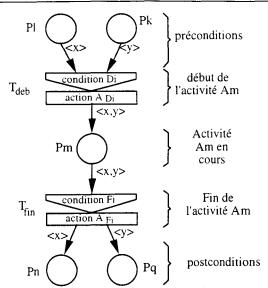


Figure 1-22 : Modélisation d'une activité à l'aide du formalisme RdP Objet

Les autres fonctions sont séparées. Elles utilisent des techniques à base de RdP, de système expert incluant des méta-règles.

Les types de reprise sont fondés sur le concept d'activité. Selon le contexte, il est envisagé d'abandonner la séquence d'activités contenant l'activité défaillante, de recommencer tout ou une partie de cette séquence, ou de continuer. Ces décisions font appel à des connaissances comme le classement des activités selon le caractère réversible ou non de ces dernières, le taux d'occupation des ressources...

Les questions relatives à la reprise ont été spécifiées [BON 93]. Elles dénoncent un besoin en informations concernant l'état du procédé et des produits après défaillance, les enchaînements d'activités hors fonctionnement normal, et la connaissance des potentialités du procédé et de la commande. De plus, l'élaboration de la séquence doit d'abord être établie dans son intégralité sans qu'aucune action ne soit engagée. L'utilisation de modèles en parallèle est donc fortement conseillée. Une partie de ces points a été traitée par la mise en place d'un système d'information [CHA 95/c] permettant de gérer les informations nécessaires pour le diagnostic et la reprise.

3.2.2.4 Travaux du LAIL équipe ASPIC

Les travaux de l'équipe Analyse et Surveillance des Processus Industriels Complexes (ASPIC) sont appliqués à des systèmes de nature continue. Ils sont complémentaires des travaux de l'équipe PFM présentés après.

La supervision est vue comme un système permettant de générer des alarmes filtrées (surveillance), de fournir des informations validées et de poursuivre la conduite du système en mode dégradé (cf. Figure I-23).

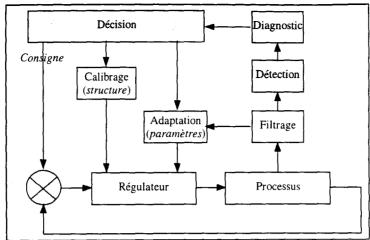


Figure I-23: Schéma conceptuel de la supervision

Les méthodes de surveillance utilisées sont fondées sur la connaissance d'un modèle décrivant le fonctionnement de l'installation. Les écarts observables entre le comportement du procédé et celui déduit du modèle sont exprimés par des résidus [CAS 94]. La conception hors ligne des résidus en utilise différents types de modèles. Ces résidus sont calculés en ligne et alimentent la détection. Celle-ci déduit les relations non vérifiées et indique si l'hypothèse d'une défaillance est probable. La localisation affine ce résultat en cas de détection d'un fonctionnement défaillant et affecte la défaillance à un ou plusieurs composants.

Dans le cadre de la répartition de l'intelligence, l'équipe ASPIC s'intéresse à la modélisation générique des capteurs intelligents. Les modèles décrivent à la fois les fonctions internes du capteur et les services rendus ainsi que leur organisation (modes d'utilisation, modes de marche) [GEH 94], [STA 95]. Le modèle générique d'un système, vu comme un ensemble de composants interconnectés, est constitué par composition de sous-modèles génériques [BOU 97].

Des travaux en cours s'intéressent à la reconfiguration des SAP. Ils sont fondés sur la notion de service qui est indivisible dans le cas d'un système de nature continue. Un service est décliné en versions en fonction des ressources qui peuvent participer à sa réalisation. Les possibilités de reconfiguration reposent sur l'existence de multiples versions.

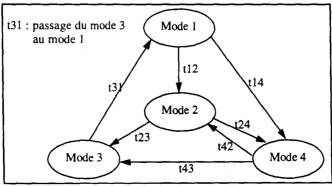


Figure 1-24: Automate des modes d'exploitation

Les services sont regroupés en sous-ensembles cohérents appelés modes d'exploitation (cf. Figure I-24). A chaque mode d'exploitation correspondent des objectifs que le système doit assurer. Par exemple : atteindre les valeurs de consignes, maintenir les valeurs de consignes, préserver l'environnement, vidanger totalement le système... Les objectifs sont réalisés par les services du niveau hiérarchique de décomposition le plus élevé. Les décisions sont prises en fonctions des conséquences de la disparition d'un service élémentaire. Plusieurs cas sont étudiés [GEH 98]:

- Certaines versions des services de niveaux supérieurs disparaissent mais il reste toujours une version au moins pour réaliser les services correspondant aux objectifs du mode courant. Dans ce cas, le système est reconfigurable.
- Certains services du mode d'exploitation courant disparaissent. Il n'existe plus de version permettant de les réaliser. Les objectifs du mode ne peuvent plus être satisfaits.
 Il convient alors de basculer vers un autre mode (mode de repli dans le pire des cas).
- Certains services d'un mode d'exploitation accessibles depuis le mode courant disparaissent. Il faut empêcher la transition vers ce mode.

3.2.2.5 Travaux du LAIL équipe PFM

Les travaux de l'équipe PFM (Production Flexible Manufacturière) du Laboratoire d'Automatique et d'Informatique industrielle de Lille (LAIL) sur la supervision sont organisés autour de trois grands thèmes : la surveillance, la gestion des modes, et le pilotage.

3.2.2.5.1 Travaux sur la surveillance

La surveillance du procédé consiste à détecter et diagnostiquer les pannes du procédé. Pour la commande, elle consiste à vérifier que celle ci est compatible avec l'état du procédé.

L'utilisation d'un modèle du procédé en tant que filtre est à la base de la surveillance. Cette dernière a pris deux orientations complémentaires : la surveillance réactive et la surveillance déductive.

La surveillance réactive est locale, de bas niveau [ELK 93]. Elle permet l'élaboration d'une commande sûre ainsi qu'une détection directe et une localisation immédiate des défaillances suite à l'émission d'une commande. L'approche intercale une interface entre partie commande et le procédé. Cette interface est structurée selon la Figure I-25.

• Le Module du Filtre des Commandes (MFC) a pour fonction d'éviter la réalisation des commandes incompatibles avec l'état du procédé. Pour ce faire, le procédé est

décomposé en composants dont les comportements sont modélisés par des Objets Commandables Elémentaire (OCE). Les OCE sont regroupés en fonction de leurs contraintes de fonctionnement définissant un Composant Fonctionnel Logique (CFL). Ce CFL agit comme un filtre pour la commande. En cas de non-compatibilité, la commande est rejetée et va donner lieu à un recouvrement d'erreur ;

- Le Module de Contrôle des Commandes vérifie, pour chaque composant modélisé par un OCE, l'exécution ou la non exécution d'une commande au travers de l'analyse du compte rendu émis par le procédé. Ce contrôle est fondé sur la notion de chien de garde. L'utilisation des langages synchrones assure une acquisition quasi-instantanée des changements effectifs des états du procédé;
- Le recouvrement d'erreurs a pour objectif de court-circuiter la commande normale afin de mettre le système dans un état exempt d'erreurs;
- Si le recouvrement d'erreurs ne peut confiner l'erreur, le module de traitement des anomalies aura pour objet d'assurer la mise hors service de l'OCE et de solliciter une reconfiguration de la commande.

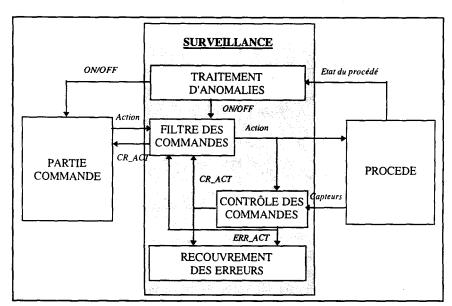


Figure 1-25: Surveillance directe

La surveillance déductive [TOG 92] est liée à l'interprétation immédiate ou induite des symptômes. Elle se décompose en détection, diagnostic et recouvrement.

La détection repose sur une analyse temporelle du procédé, dont le modèle est utilisé en filtre. A chaque opération Opi, est associé un compte rendu Cri. Une fenêtre temporelle, correspondant à la limite de validité de Cri est définie (cf. Figure I-26). Un symptôme est déclenché lorsque l'occurrence de Cri ne s'est pas produite dans l'intervalle de validité.

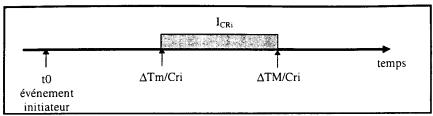


Figure 1-26: Intervalle de validation de compte-rendu

Le diagnostic est structuré en deux étapes : localisation et identification.

La localisation circonscrit l'origine de la défaillance à une zone du système. Son mécanisme est mis en oeuvre par l'interprétation des Signatures Temporelles Causales (STC) qui correspondent à des suites de symptômes ordonnés dans le temps et séparés par des intervalles quantifiables. Une STC va ainsi modéliser le comportement défaillant d'une partie du système.

L'identification a pour rôle de déterminer précisément les fonctions initiatrices de la défaillance. Elle est fondée sur une propagation d'hypothèses dans un modèle appelé graphe fonctionnel (GF). Le GF modélise les liens de dépendance fonctionnelle entre les fonctions d'un système et celles de ses composants (cf. Figure I-27). Suite à l'exploration du GF, certaines hypothèses, générées par les STC, seront validées en fonction des données des noeuds directement observables.

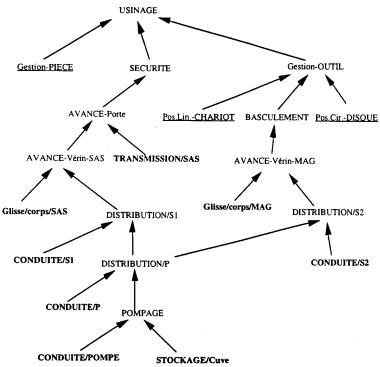


Figure I-27: GF du centre d'usinage

Les deux approches présentées sont complémentaires. La surveillance réactive garantit une commande saine ainsi qu'une détection et une localisation des défaillances des éléments directement observables. Elle nécessite l'utilisation de nombreux capteurs. La surveillance

déductive permet la détection et le diagnostic des défauts de ressources qui peuvent être non directement observables, en faisant l'hypothèse d'une commande saine.

3.2.2.5.2 Travaux sur la Gestion des Modes

Les travaux sur la Gestion des Modes sont fondés sur la notion de famille de modes (modes de marche, modes de fonctionnement, mode d'utilisation, ...) [KER 96], [TOG 96/a]. Ces familles évoluent en parallèle (Figure I-28). Certains états peuvent être contraints.

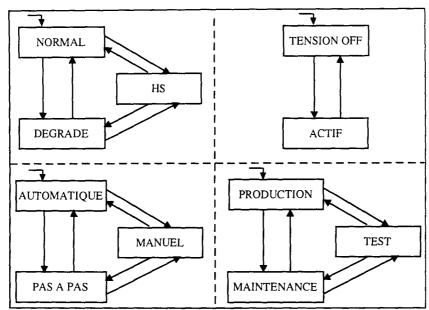


Figure I-28: Familles de modes

L'approche utilise un modèle hiérarchisé qui permet de vérifier à chaque niveau de la structuration la cohérence des modes entre les machines compte tenu des contraintes.

La démarche proposée permet de construire un modèle du SFPM, appelé Chargement Opération Déchargement (COD) [KER 96]. Ce modèle est obtenu par analyse ascendante des contraintes [BOI 91] de fonctionnement entre opérations. La racine de l'arborescence représente une opération virtuelle de COD. Les feuilles décrivent les opérations effectives auxquelles sont associées les ressources. Les noeuds intermédiaires expriment les opérations virtuelles résultant de la composition logique (ET logique, OU logique) des opérations de niveau inférieur. La représentation fonctionnelle établie fait ressortir les principes d'organisation du SFPM.

La transcription du COD dans un langage synchrone graphique (ARGOS) permet une mise à jour réactive du modèle. Cette mise à jour correspond à des changements de mode de ressources ou du système lui-même.

3.2.2.5.3 Travaux sur le pilotage

Le pilotage a été élaboré autour du contrôle temps réel des tâches associées aux produits. Il est organisé en centres de décision, qui ont pour mission de résoudre les conflits d'accès aux ressources [TAW 95]. Afin de privilégier la réactivité, les décisions commencent par être locales (utilisation des marges, permutation d'opérations). Des fonctions de priorité, intégrant la charge des ressources et les temps de transit, ont été développées afin de gérer les indéterminismes dûs principalement à la flexibilité de routage.

3.2.2.6 Autres contributions

Sans être exhaustif, nous citons aussi les approches du LISA, LAN et LAP, ainsi que des travaux s'intéressant à la récupération automatique des erreurs.

L'approche de commande/surveillance développée au Laboratoire d'Ingénierie des Systèmes Automatisés d'Angers (LISA) est composée de quatre modules [DAN 97]: le système de commande [GOD 96], le module de détection, le module de diagnostic / décision et le module de spécification du mode dégradé. Une implantation basée sur les RdP a été réalisée en utilisant l'atelier logiciel Petri Maker [GOD 95].

Les travaux du Laboratoire d'Automatique de Nantes [BIL 94] concernent l'étude des modes d'exploitation. L'approche de modélisation proposée tient compte de la nature hiérarchique du système. Elle est ascendante et utilise la composition d'automates. La coordination verticale des GEMMA associés aux entités élémentaires ou composées est ainsi assurée.

Le Laboratoire d'Automatique et de Productique (LAP) de Bordeaux a développé une approche du contrôle/commande intégrant des préoccupations d'ordonnancement et tenant compte des problèmes liés à l'occurrence de défaillances. La commande est divisée en modules : commande prédictive, commande dynamique et commande en ligne [BER 95]. L'objectif est de fournir une séquence de tâches à lancer et compatible avec l'état actuel du procédé. Les techniques utilisées font appel aux graphes (graphes de flux, réseaux-GRAI [PUN 84], ...) et à l'intelligence artificielle.

Les problèmes liés à la récupération automatique des erreurs dans un SAP modélisé par RdP ont été abordés par Zhou [ZHO 89]. L'aspect considéré est principalement celui de la reconfiguration de la commande. La méthode préconise l'extension du modèle RdP selon quatre possibilités : réactivation de l'opération (répétition) ou d'une opération complémentaire (chemin alternatif), retour à un état précédent, anticipation. Ces réseaux supplémentaires seront activés lorsqu'une erreur aura été détectée. Les indéterminismes sont levés en fonction

de stratégies prédéfinies. Le système n'est don apable de corriger que les types d'erreurs anticipées lors de la conception. Avec ces techniques, le programme peut contenir jusqu'à 90% de code dédié à la reprise [ZHO 89]. Les faiblesses de cette approche proviennent du fait que le code est spécifique pour chaque type d'erreur. Une bonne partie du code peut être écrit pour des types d'erreurs qui ne surviendront pas dans la vie du système. Par ailleurs, le code nécessite d'être constamment réactualisé quand une erreur non prévue est détectée et identifiée.

3.2.3 Conclusion

Le panorama présenté montre la diversité des contributions, tant sur le plan des méthodes et outils utilisés, que sur la structuration adoptée. Nous remarquons aussi des divergences au niveau de la terminologie utilisée. Ce problème a d'ailleurs été soulevé lors des réunions du GRP-SPSF (Groupement de Recherche en Productique - Systèmes de Production Sûrs de Fonctionnement) dont un des axes est de dégager, si ce n'est une terminologie commune, du moins un cadre d'hypothèses permettant à chacun d'évoluer et d'être compris par la communauté. Les réflexions sont engagées. Nous apportons notre contribution, dans le chapitre suivant, en proposant une structuration de la supervision dans le contexte des systèmes automatisés de production, principalement de type manufacturier, tels qu'ils ont été présentés au début de ce chapitre.

Concernant les problèmes liés à une réaction après défaillances, nous retenons de la présentation des différents travaux que l'aspect opérationnel a souvent prévalu par rapport à l'aspect décisionnel. De nombreux travaux ont spécifié les solutions à apporter mais peu se sont intéressé à l'élaboration du choix d'une solution. Souvent, la connaissance a priori de la panne est nécessaire. L'aspect reconfiguration de l'architecture (remise en marche de ressources, utilisation d'autres fonctionnalités d'une ressource, ...) n'a pas été détaillé.

Nous remarquons aussi que le système de transport a peu été considéré. Or ce dernier est aussi important que les ressources de transformation. L'activité de production du système résulte, en effet, d'une coopération entre ces deux types de ressources. Les produits, présents dans le SFPM au moment de la défaillance, ont peu été pris en compte. Or, Il se peut que cette défaillance se produise sur une ressource transformant une pièce. Cette dernière risque d'être mal usinée. Elle doit donc être contrôlée avant d'autoriser la poursuite de sa séquence de production.

Toutes ces remarques nous amènent à aborder et développer, au cours des chapitres qui suivent, l'aspect "décision après défaillance" supporté par la fonction de recouvrement.

Chapitre II:

Vers une approche de la supervision par le recouvrement

Ce chapitre présente des réflexions engagées sur la supervision des SFPM ainsi que sur le recouvrement, abordé comme une fonction décisionnelle de la supervision.

Il précise tout d'abord le rôle de la supervision. La valeur ajoutée de la supervision dans la réaction face à une panne est soulignée. Dans ce contexte, une structuration de la supervision est proposée. Puis, le recouvrement, fonction de décision de la supervision intervenant après détection et diagnostic d'une panne, est abordé. Les types d'action, que le recouvrement peut être amené à décider, sont développés.

Nous nous intéressons afin à montrer la nécessité d'un modèle de la partie opérative pour le recouvrement. Les bases du modèle sont présentées. Le modèle complet sera dévoilé dans les parties suivantes (B et C) du mémoire.

1. Proposition d'une structuration de la supervision

Cette proposition précise l'approche de l'équipe PFM du LAIL. Elle a pour objectif de définir le vocabulaire utilisé tout au long du mémoire et de positionner les fonctions de la supervision, ainsi que leur enchaînement pour mener à bien le processus de Supervision. L'approche système va donc être considérée.

Cette section va arrêter la définition de la supervision.

1.1 Présentation générale

D'après la définition énoncée au chapitre I, la supervision garantit les objectifs du système de production et empêche les dérives du système commandé. Souvent, le SFPM est vu selon un unique axe de la commande vers le procédé. Nous en prenons pour preuve la structure hiérarchique souvent utilisée. La prise en compte des défaillances nécessite de voir également le procédé comme un générateur de pannes, auquel il va falloir appliquer une réaction. Deux types de fonctionnement sont donc à considérer pour la supervision :

- Le fonctionnement dans un état déterminé. Nous entendons par là tout type de fonctionnement spécifié (initialement qualifié de normal et dans un mode déterminé).
- La réaction après occurrence d'une défaillance. Elle a pour objet de remettre le SFPM dans un état stable et de spécifier de nouvelles contraintes de fonctionnement.

Nous nous plaçons dans l'hypothèse d'une commande non déterministe au niveau de l'affectation des produits, du routage, ... Ces degrés de libertés sont ainsi pris en compte très tard et résolus en exploitation. L'avantage est que ceci permet de considérer la flexibilité comme une potentialité et de l'utiliser pour faire face à un aléa. Le rôle de la supervision est de paramétrer cette commande afin de coller aux plus près aux objectifs de production fixés.

En fonctionnement déterminé, elle met les ressources utilisées dans un mode spécifique pour la production et lève les indéterminismes de commande.

Lorsqu'une défaillance apparaît, la supervision analyse l'impact de la défaillance et utilise les potentialités du SFPM afin de satisfaire au mieux l'objectif de production.

Les activités de la supervision sont des activités de décision et de mise en oeuvre. La décision intervient dans la levée des indéterminismes en phase de fonctionnement spécifié et dans le choix d'une réaction après défaillance. La mise en oeuvre intervient à la fois au niveau

des produits et au niveau des ressources. Cette dualité est initiée par la démarche CASPAIM qui différencie approche-produit et approche-système.

Deux schémas vont présenter les différentes fonctions, déclinant les activités de la supervision intervenant lors des deux phases énoncées. Leur enchaînement est représenté par l'intermédiaire des informations qu'elles génèrent et utilisent. Les fonctions sont détaillées dans les paragraphes suivants. Le modèle de l'ensemble des informations n'est pas présenté. Il fait l'objet de travaux associés au concept de référentiel [BIG 98].

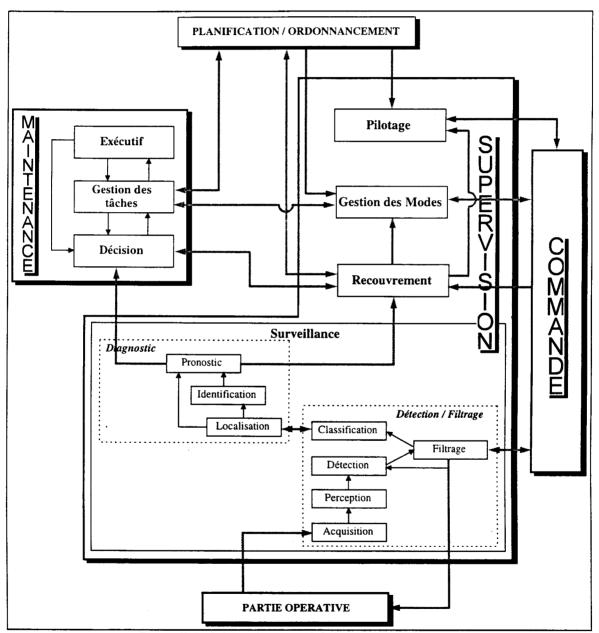


Figure II-1: Schéma fonctionnel de la supervision [BER 96]

Dans le but de mieux contrôler le SFPM, nous avons choisi d'intégrer la surveillance dans la supervision. Ceci va dans le sens de l'activité de contrôle des tâches défini pour la supervision (cf. chapitre I §3.1). En effet, afin de contrôler une tâche, il faut en surveiller la réalisation. De plus, l'ensemble des informations concernant la défaillance a un format

directement exploitable par d'autres fonctions de la supervision intervenant pour mener à bien une réaction. Ces informations sont directement accessibles, ce qui augmente la réactivité de la supervision.

1.1.1 Schéma de fonctionnement spécifié

A partir des considérations énoncées, nous décomposons la supervision selon la Figure II-1. Ce diagramme permet de situer les différentes fonctions de la Supervision. Il faut noter que ce diagramme est une représentation sans notion de hiérarchie.

1.1.2 Schéma de réaction après défaillance

La Figure II-2 reprend les fonctions de la figure précédente. Elle montre l'enchaînement de certaines fonctions afin d'élaborer la réaction en cas de défaillance.

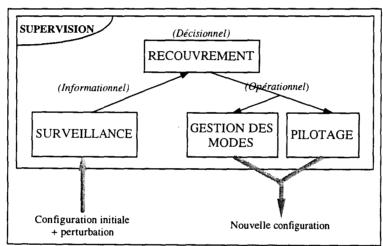


Figure II-2 : Schéma de réaction face à une défaillance

Après décision du nouvel état à atteindre, la supervision se comporte comme dans le cas précédent : fonctionnement spécifié. Les données tactiques sont bien entendu changées, mais le principe reste le même.

Ce diagramme montre que la réaction résulte de l'enchaînement des niveaux informationnel, décisionnel et opérationnel respectivement supporté par la surveillance, le recouvrement et la gestion des modes.

1.1.3 Remarques

Ces diagrammes fonctionnels ne tiennent pas compte des moyens utilisés afin de mettre en oeuvre les fonctions. En particulier, l'Homme, que nous avons cité comme partie intégrante du SFPM, doit être considéré comme pouvant intervenir à n'importe quel niveau du processus informationnel, décisionnel et opérationnel. Il possède des facultés d'adaptation, d'anticipation, et de prise de décision, qui en font un acteur indissociable de l'activité de supervision. Il pourra notamment intervenir pour une décision finale ou pour compenser

certains types de pannes. Ceci est d'autant plus vrai que l'automatisation se fonde sur l'utilisation d'un modèle représentant partiellement des connaissances. L'Homme, par son expérience, sa fonction de capteur polyvalent, et sa faculté d'abstraction, va être à même de fournir au système des informations pertinentes [BON 93].

Comme présenté au chapitre I, la supervision fait en quelque sorte le lien entre des fonctions nécessitant d'avoir un haut degré d'abstraction du SFPM et celles ayant une contrainte liée au temps de réaction, donc plus proches du procédé. Elle considère ainsi différents niveaux de vision du SFPM. Les Figures II-1 et II-2 correspondent à des approches fonctionnelles. Elles sont à projeter sur une structure hiérarchique. L'approche multi-niveaux est donc privilégiée.

1.2 Détail des fonctions

Les paragraphes qui suivent détaillent les fonctions présentées dans les Figures II-1 et II-2. La supervision se décompose en modules de pilotage, surveillance, recouvrement, et gestion des modes [BER 96], [TOG 96/a].

1.2.1 Le pilotage

Comme nous l'avons vu lors de la présentation du projet CASPAIM au chapitre I §2.3.2, les Gammes Opératoires Etendues (GOE), qui expriment les différentes tâches à réaliser sur les produits, peuvent être non déterministes. De plus, plusieurs GOE peuvent évoluer en parallèle. Une ressource peut donc être sollicitée par plusieurs produits. Le Pilotage a pour rôle de lever ces derniers indéterminismes en fonctions de données de l'ordonnancement et de règles de priorité [TAW 95], dans le cadre d'une supervision en fonctionnement dans un état spécifié. Dans le cas d'une réaction face à une défaillance, ces données proviennent du module de recouvrement.

La levée des indéterminismes est réalisée dans deux cas :

- Le pilotage possède la solution précalculée de l'ordonnancement, sous la forme de priorités statiques. Actuellement ceci est surtout valable pour les ressources de transformation;
- Le pilotage établit dynamiquement le cheminement des pièces dans le système, et plus particulièrement le système de transport, en fonction de la charge de ce dernier [TAW 95].

Une des caractéristiques principales du module de pilotage est sa contrainte temps réel.

1.2.2 La surveillance

Le rôle de la surveillance consiste à suivre le déroulement du fonctionnement du système dans le but de détecter les anomalies (dysfonctions de procédé et de commande, dérives de qualité et de flux), de localiser le sous-système défaillant et d'en identifier les causes. Elle est prise en compte dès la conception du SFPM. En exploitation, elle s'interface avec le procédé et la commande. Elle contribue, pour une grande part, à la sécurité, mais participe surtout à la disponibilité des moyens de production.

Afin de répondre à ces objectifs, la surveillance est décomposée en système de détection / filtrage et système de diagnostic. Cette structuration est à comparer avec celle du LAAS. Mais, dans notre approche, la détection n'est pas incluse dans la commande. Ceci permet d'avoir plusieurs types de détection (voir travaux du LAIL au chapitre I §3.2.2.5) selon l'observabilité du défaut. Nous allons maintenant définir les fonctions composant ces systèmes.

1.2.2.1 Le système de détection / filtrage

Le système de Détection / Filtrage est fortement dépendant de la contrainte temps réel. Pour cette raison, on l'isole du système de diagnostic qui utilise des techniques de résolution non compatibles avec cette contrainte. La fonction du système de Détection / Filtrage est de détecter les symptômes et d'évaluer a priori la sévérité du défaut (défaut critique ou seulement significatif). En fonction de la réponse, soit une procédure d'urgence via le module de recouvrement sera mise en oeuvre, soit le diagnostic seul sera informé.

Le système de Détection / Filtrage comporte plusieurs fonctions élémentaires :

- L'acquisition a pour rôle d'acquérir les données pertinentes du procédé. Elle peut être périodique ou événementielle.
- La perception se résume en une identification et une estimation de paramètres. Elle est conçue comme une fonction de compression d'informations puisqu'elle extrait, à partir des données issues d'un capteur, les indicateurs de défauts pertinents nécessaires à la détection. Par exemple, on va lisser un signal, enlever les bruits de fond et ne conserver que les valeurs significatives.
- La détection signale les anomalies rencontrées au niveau du procédé [TOG 92]. Le comportement dynamique du système observé et celui d'un modèle temporel du procédé sont comparés. S'il y a concordance, un compte rendu est envoyé au filtre et à la commande, ce qui permet l'évolution de la commande. Sinon, un symptôme est généré et il y a un gel implicite de la commande en cours. Il faut préciser que le gel de

la commande peut n'être que provisoire, dans la mesure où il n'est pas toujours adapté, pour sécuriser le SFPM. Il doit ensuite être suivi par des actions de recouvrement qui remettront le SFPM dans un état stable.

• Le filtrage réalise, à partir d'un modèle intégrant des contraintes de fonctionnement, une prédiction du comportement du procédé en fonction des commandes qui seront envoyées au procédé [ELK 93]. Nous attirons l'attention sur le fait que cette notion est différente de celle utilisée en automatique. Cette fonction utilise l'avantage de l'approche par filtre du CRAN, appliquée à des commandes évoluées. Si les contraintes de bon séquencement de la commande, en particulier du point de vue sécurité, sont vérifiées, la commande est envoyée au procédé. Par exemple, pour un tour, on interdira la mise en rotation de la broche si les portes ne sont pas closes ou si les mors du mandrin ne sont pas serrés. Dans notre approche, toute commande évoluée passe par le filtre. La commande envoyée au procédé est donc saine, c'est à dire compatible avec l'état de ce dernier. Le filtre est élaboré pour un mode donné. Lorsqu'une panne a été détectée et identifiée, la partie de filtre en rapport avec cet élément défaillant est réactualisée afin de pouvoir continuer à commander le système. Dans son principe, cette approche rejoint celle du LAI où un compensateur est substitué au superviseur de la commande.

La détection et le filtrage sont duaux et réalisent une surveillance du procédé commandé.

- La classification évalue le degré de sévérité des anomalies détectées au niveau du procédé. Cela permet de savoir si le système a assez de temps pour lancer une procédure complète de diagnostic ou s'il doit prendre immédiatement des mesures afin de garantir la sécurité sur le plan humain comme sur le plan des machines. Nous distinguons deux cas [TOG 92]:
 - 1. Le défaut est jugé **critique**. Par exemple, sur un robot manipulateur l'effort au niveau d'un axe de bras devient subitement important. Cela peut signifier la collision du bras du robot avec un obstacle. Pour ce type de défaut, des actions d'urgence peuvent avoir été prédéterminées (gel de la commande et repli). Il faut immédiatement les mettre en oeuvre. Le diagnostic est aussi informé afin de préciser les causes de la défaillance qui seront éventuellement transmises au recouvrement.
 - 2. Le défaut est **significatif**. Si le non-passage, dans une fenêtre temporelle, d'une pièce devant un capteur de position est détecté, il peut s'agir d'un arrêt du

convoyeur ou d'un tard causé par une micro-coupure électrique au niveat du système de transport. Le système de diagnostic est sollicité afin d'analyser plus finement les causes du défaut et éventuellement ses conséquences. Les conclusions du système de diagnostic seront ensuite transmises au module de recouvrement.

La classification nécessite d'avoir répertorié les pannes jugées critiques et de leur avoir affecté une procédure prédéterminée. Sa finalité est une réduction du temps de mise en place des procédures d'urgence. En effet, lorsqu'un symptôme est classé comme étant critique, le diagnostic (souvent assez long) et le recouvrement sont simultanément informés (Figure II-4). La procédure d'urgence étant rapidement appliquée, le SFPM peut être rendu disponible par application d'une procédure intervenant en deuxième phase du recouvrement. La classification permet d'intégrer, dans le processus de supervision, des actions de réaction déterminées hors-ligne, comme pour l'approche du LAI, dans une approche où tous les défauts ne sont pas explicitement prévus.

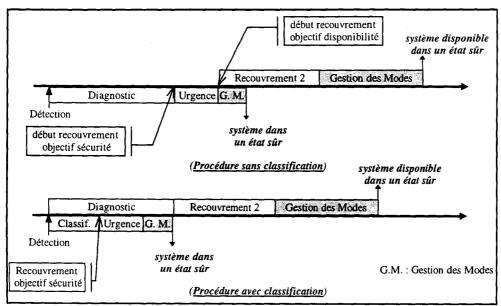


Figure 11-3: Intérêt de la classification (cas d'une défaillance critique)

1.2.2.2 Le système de diagnostic

A partir des symptômes détectés par le système de Détection / Filtrage, le système de Diagnostic va déterminer plus précisément la cause initiatrice de la défaillance, et évaluer la propagation de cette même défaillance.

Ce système peut se décomposer en trois fonctions [TOG 92] :

• La localisation détermine le sous-ensemble fonctionnel défaillant sans forcément se situer au niveau de l'organe défectueux. Reprenons le cas du convoyeur. Le symptôme stipulant qu'une pièce n'est pas passée, comme attendu, devant un capteur de position

est fourni par la détection. D'autres capteurs, répartis sur le même tronçon du convoyeur, fournissent le même type d'information. La localisation détermine que la fonction de convoyage est défaillante pour ce tronçon. Il faut remarquer que si l'on se place à un niveau assez bas dans la structure du SFPM, de façon à ne détecter que des défaillances directement observables, la localisation induira automatiquement une identification de la défaillance.

- L'identification donne les causes qui ont engendré la ou les défaillances. Reprenons l'exemple du tronçon de convoyeur arrêté. L'identification peut se rendre compte que le moteur d'entraînement ne fonctionne plus mais qu'il est toujours alimenté. Elle conclura à un problème au niveau des charbons du moteur.
- Le pronostic s'intéresse à la propagation des défaillances. Il indique les conséquences inéluctables et mesure les conséquences qui peuvent être anticipées de façon à ne pas solliciter les sous-systèmes de la ressource défaillante. Par exemple, le modèle fonctionnel du convoyeur précédent montre que le moteur en panne participe normalement à la réalisation d'autres transferts. Ces transferts sont considérés comme défaillants sans qu'aucun processus de détection n'intervienne. Le pronostic évitera donc d'aller solliciter ces transferts et de s'apercevoir, a posteriori, qu'aucune pièce ne peut être transférée. Le pronostic est une étape sans laquelle la prise de décision n'est pas faisable.

1.2.3 Le module de recouvrement

Alors que les systèmes de détection et de diagnostic se contentaient d'observer le SFPM et d'indiquer des résultats concernant l'état actuel du procédé, le recouvrement va décider, en présence de défaillances, des actions à mener afin de s'approcher le plus du fonctionnement nominal du SFPM. Nous efforçant de séparer l'aspect informationnel de l'aspect décisionnel, nous avons décidé de ne pas inclure le recouvrement dans le module de surveillance comme cela peut être le cas dans certaines approches de la surveillance [SAH 87].

Sur un changement d'état du système dû à une défaillance, le recouvrement détermine un nouvel état pour le SFPM en tenant compte des objectifs de production et de la configuration opérationnelle des ressources de production. Il décide d'un ensemble ordonné d'actions correctives modifiant la configuration du procédé et de la commande de manière à assurer la sécurité et le maintien d'un taux de production acceptable. Son objectif est à rapproché de celui de la décision / reprise, abordé au LAAS. Comme nous le verrons par la suite, notre approche considère à la fois les modes des ressources, les flexibilités de l'architecture et les

produits. Le recouvrement vient en complément des travaux sur le niveau stratégique de la reconfiguration, développé au LAMIH.

Généralement, les décisions du recouvrement doivent tenir compte de deux impératifs contradictoires : sécurité et disponibilité.

- 1. Impératif sécurité. Une demande de mise en repli immédiate permet d'éviter la propagation de la défaillance. Il s'agit d'un recouvrement dit réflexe. Par cette procédure d'urgence, la sécurité est assurée. Mais elle entraîne une indisponibilité partielle ou totale du système mis en cause. Une procédure prédéfinie moins contraignante peut ensuite être lancée.
- 2. Impératif disponibilité. Le système de recouvrement arrête un ensemble d'actions correctives permettant d'effectuer une nouvelle organisation du système de production en vue d'une reprise dans un autre mode. Prenons le cas d'un tour et supposons qu'on détecte la non mise en rotation de la broche. Après diagnostic, le système de recouvrement demandera l'arrêt de ce tour en position de repli et affectera, si possible, l'opération de tournage à un autre tour.

Le but de ces actions est de réduire le temps d'indisponibilité du SFPM. Le recouvrement est détaillé dans la section suivante.

1.2.4 La gestion des modes

La gestion des modes a une image instantanée des ressources du procédé. Elle assure la cohérence des modes entre les ressources, compte tenu de leurs relations de dépendance comportementale.

Plusieurs familles de modes ont été identifiées [KER 96], [TOG 96/a]. Elles rendent compte d'un état d'un système selon un point de vue précis. Chaque famille possède un état neutre (premier état dans la description qui suit) et des états spécifiant différents cas du point de vue. Nous distinguons cinq familles de modes [TOG 96/a]:

- Les modes de marche (arrêt, automatique, semi automatique, cycle par cycle, pas à pas);
- Les modes d'arrêt (marche, hors tension, initialisation, en fin de cycle, dans un état déterminé);
- Les modes de fonctionnement (normal, dégradé ou hors service) ;

- Les modes d'exploitation (au repos, test, production, maintenance);
- Les modes de production (arrêt, préparation, permanent, clôture).

En phase d'exploitation du SFPM, ces familles évoluent en parallèle. A un instant t, seul un état de chaque famille est actif. Nous citerons le cas d'un SFPM en mode d'exploitation production et en fonctionnement normal. Nous attirons l'attention sur le fait que certaines combinaisons d'états entre les familles sont interdites. Par exemple, le mode de production permanent et mode d'arrêt hors tension sont incompatibles. Ces combinaisons peuvent aussi être contraintes par le concepteur. Cette notion de famille de modes est complémentaire des approches développées sur les modes par les autres laboratoires.

Dans le cas d'une réaction après défaillance, la gestion des modes est vue comme l'organe d'action du recouvrement. Ayant une connaissance exhaustive de la configuration actuelle du SFPM, elle gère le transitoire entre cet état courant et le nouvel état à atteindre précisé par le module de recouvrement [BER 96]. Prenons l'exemple d'un tour T chargé et déchargé par un robot R, qui lui est exclusivement rattaché. Le mauvais positionnement de l'outil de coupe de T est diagnostiqué. Le module de recouvrement va demander, entre autres, l'arrêt de T. Le module de gestion des modes lancera la procédure : "arrêt de T, déchargement de T, puis arrêt de R" et gérera pour chaque machine les modes d'arrêt. Pour ces différentes actions, la gestion des modes active différents modèles de la commande. Pour ce cas, la gestion des modes est à mettre en parallèle avec l'approche développée au LAMIH pour la reconfiguration tactique. Elle est complémentaire en assurant aussi la cohérence des modes entre les ressources, compte tenu des contraintes.

1.3 La supervision dans CASPAIM

Nous avons dissocié la commande élémentaire des ressources du module chargé de leur paramétrage, ce qui nous a permis de définir plus précisément la Supervision.

Concernant la prise en compte de la supervision dans CASPAIM, nous proposons le schéma suivant (cf. Figure II-5). La démarche initiale présentée au chapitre I §2.3.2.1 est présentée en gris.

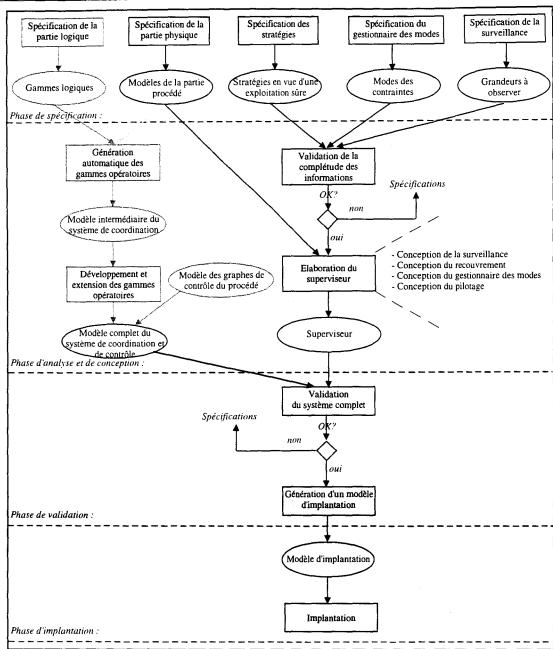


Figure II-4: Démarche CASPAIM modifiée intégrant la supervision

La phase de spécification de la supervision a pour but de définir de manière cohérente les types de fonctionnement ainsi que les types de réactions à adopter face à des défaillances. Elle permet au concepteur de préciser les objectifs globaux. Elle se décompose en une série de spécifications, qu'il convient de mener en parallèle, suivie d'une étape de validation. Selon des critères d'observabilité, les types de surveillance (directe ou indirecte) à utiliser sont précisés. Les contraintes entre modes des ressources sont explicitées. Les seuils définissant le taux de dégradation d'une ressource ainsi que les paramètres à considérer pour apprécier l'état du SFPM dans une configuration donnée sont pris en compte. C'est aussi à ce niveau que seront spécifiées les stratégies permettant un fonctionnement sûr du système. Elles interviendront plus particulièrement pendant la phase de réaction face à une défaillance.

La validation des spécifications permet de vérifier que les informations sont complètes avant de concevoir les différentes fonctions de la supervision. L'objet sera d'examiner si des réactions appropriées ont été envisagées. Par exemple, on s'assurera que, pour chaque panne sévère prise en compte, et considérée comme critique vis-à-vis de la sécurité, il existe une procédure d'urgence prédéterminée. Pour d'autres cas, on s'assurera de la cohérence des informations utilisées et fournies par les fonctions de détection, diagnostic, recouvrement et gestion des modes (cf. Figure II-1).

Lors de l'élaboration du superviseur, toutes ces fonctions sont conçues simultanément avec la commande. Ceci est rendu possible grâce à l'utilisation de techniques d'ingénierie simultanée s'appuyant sur un référentiel [BIG 98]. Ainsi la démarche d'intégration globale est assurée par le biais de la conception de la supervision.

Les modifications précédentes vont se trouver répercutées au niveau des phases de validation et d'implantation. Puisque les fonctions de la supervision sont séparées de la commande, les travaux concernant l'implantation de la commande sont repris. Les fonctions de surveillance, recouvrement, gestion des modes et pilotage font l'objet d'implantations spécifiques.

<u>Conclusion</u>: La structuration de la supervision nous a permis de montrer deux types de fonctionnement à savoir le fonctionnement dans un état déterminé et la réaction après occurrence d'une défaillance. Cette dernière intéresse aussi particulièrement les industriels. En effet, dans le contexte où il est admis que les défaillances ne peuvent pas être évitées, la supervision permet d'en minimiser l'impact sur le plan de production. Elle a donc un intérêt au niveau économique.

Dans les précédents travaux du LAIL s'intéressant aux fonctions de la supervision, l'aspect recouvrement a été esquissé, mais non précisé. Les équipes, se focalisant sur une problématique et un objectif précis, dans le contexte d'un projet fédérateur, ont fait allusion à cette fonction. Le recouvrement s'est trouvé englobé dans les fonctions de surveillance, de gestion des modes et de pilotage. Or, comme l'étude des fonctions de la supervision nous l'a montré, le recouvrement a une existence propre, tout en s'intégrant dans une chaîne de réaction.

En cas de panne, le recouvrement est le siège de l'activité décisionnelle. Les autres fonctions du processus de réaction présenté ci-dessus se situent soit au niveau informationnel (la surveillance), soit au niveau opérationnel (la gestion des modes). Le recouvrement est la fonction qui participe le plus à gérer le compromis entre sécurité et disponibilité des moyens

de production. Considéré comme un maillon de la chaîne de réaction de la supervision, le recouvrement s'insère donc dans la démarche d'intégration menée pour la supervision.

Afin de poursuivre l'intégration des fonctions de la supervision, et d'inclure des objectifs de sûreté de fonctionnement dans les objectifs-systèmes de notre approche, nous avons choisi de nous intéresser au recouvrement.

2. Le recouvrement

Les types de flexibilité, énoncés au chapitre I §1.2.2, offrent de nombreuses possibilités d'adaptation. Afin de bien exploiter ces aspects, il est souhaitable de disposer de fonctions permettant de prendre des décisions adaptées à l'état du procédé dans le but de contrôler au mieux le SFPM. Ce rôle de la supervision contribue ainsi à améliorer la productivité et la sécurité du SFPM. Dans l'approche de la supervision développée au LAIL, nous voulons privilégier comme objectif la continuité de service. Nous nous intéressons donc au recouvrement considéré comme une fonction de décision de la supervision.

Le recouvrement intervient après une perturbation. Il a été précédemment présenté comme une fonction faisant suite aux étapes de détection et de diagnostic. Il peut amener à un changement significatif de l'état du procédé. Nous allons maintenant préciser son rôle ainsi que les types d'actions qu'il entreprend de mener.

2.1 Rôle

2.1.1 Définition

La notion de recouvrement, utilisée dans le domaine de l'automatique, est un terme emprunté au domaine informatique. Il vient de la notion de recouvrement d'erreur introduite par Laprie [LAP 95]. Classiquement, il est considéré comme une fonction intervenant après la l'occurrence d'une panne (détectée et diagnostiquée). Concernant les SFPM, nous proposons la définition suivante.

<u>Définition</u>: Le recouvrement détermine un nouvel état du SFPM, nécessitant un ensemble ordonné d'actions correctives, qui vont modifier le comportement du procédé et de la commande, afin d'assurer la sécurité et la disponibilité du SFPM.

Cette disponibilité se traduit surtout au niveau du maintien de la capacité de production du SFPM. Elle va consister à essayer d'atteindre, pendant la dégradation du SFPM, une production proche du taux planifié. L'état à atteindre sera un compromis entre les objectifs de

CHAPITRE II: Vers une approche de la supervision par le recouvrement

production et les capacités du SFPM, altérées par la défaillance. Il va nécessiter de prendre des décisions concernant les ressources et les produits présents et à produire par le SFPM.

Sur la base de stratégies définies, le recouvrement va donc assurer une continuité de service, avec des performances réduites, lorsqu'une défaillance altérera le SFPM. A ce titre, notre vision de recouvrement est à rapprocher de celle de la compensation développée au LAI [NOU 97].

2.1.2 Flux d'informations

Comme le Recouvrement est à un carrefour et interagit avec de nombreuses fonctions de la supervision, il convient de noter précisément comment ont lieu ces interactions. Nous cernons ainsi les fonctions du recouvrement par une approche-système de type boite noire (cf. Figure II-5). La liste des données nécessaires au recouvrement nous permettra aussi de justifier l'utilisation d'un modèle spécifique pour représenter le procédé.

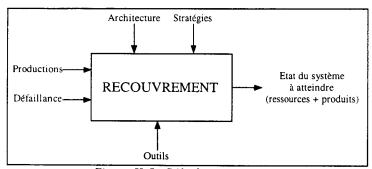


Figure II-5: Rôle du recouvrement

La structuration de la supervision (au §1.1 de ce chapitre) nous a permis de présenter les flux d'information intervenant en cas de réaction de la supervision face à une défaillance.

Pour élaborer sa décision, le recouvrement se base sur trois types de connaissances principales: des connaissances concernant la production, des connaissances concernant la défaillance survenue et des connaissances sur les potentialités du SFPM.

Les connaissances concernant la production regroupent les objectifs de production, les productions en cours. Ces informations sont fournies par la planification/ordonnancement. Pour chaque produit, il faut aussi connaître son état d'avancement par rapport à sa gamme logique lors de l'apparition de la défaillance.

Les connaissances à propos de la défaillance concernent la nature de la défaillance, le temps d'immobilisation de la ressource en panne. Elles proviennent de la détection, du diagnostic et de la maintenance. Il faut aussi connaître l'impact de la panne sur le système.

Les connaissances sur les potentialités du SFPM permettent au recouvrement de décider d'une nouvelle configuration assurant la disponibilité du SFPM.

Le nouvel état du système, déterminé par le recouvrement, est caractérisé par les gammes à fabriquer ainsi que leur temps de fabrication, et les ressources à utiliser. Ces paramètres se traduisent par la demande de mise des ressources dans des modes particuliers et par un nouveau paramétrage de la commande. Dans notre cas, le changement de modes des ressources est assuré par la gestion des modes. Le paramétrage de la commande est réalisé à la fois par la gestion des modes et par le pilotage pour les derniers indéterminismes.

2.2 Actions envisagées pour palier à une défaillance

Le recouvrement implique de mener, selon l'impact de la défaillance, des actions sur la commande ou des actions conjointes sur la commande et le procédé. Ces actions sont caractérisées par la réactivité (temps écoulé entre la connaissance de la panne et le début d'application d'une solution), l'étendue (indiquant si la procédure s'applique à la seule ressource défaillante ou au système plus global), la durée (temps pendant lequel on produira avec l'état spécifié par le recouvrement).

Ces actions vont dépendre fortement du type de défaillance et de panne. La réaction ne sera pas la même pour les cas suivants :

- usure d'un outil de coupe : continuer l'usinage tant qu'il est acceptable, modifier les paramètres de coupe ;
- blocage d'une butée de convoyeur en position entrée : relancer une commande de la butée, trouver un autre transfert équivalent ;
- collision d'un bras de robot : mettre en repli le robot.

Nous allons tout d'abord préciser la nature des défaillances et pannes considérées. Ceci constituera notre hypothèse de travail sur ce sujet pour la suite des travaux présentés dans ce mémoire.

2.2.1 Types de défaillances

La défaillance d'un système survient lorsque ce dernier cesse remplir sa ou ses fonctions. La panne est l'inaptitude d'un système à accomplir sa ou ses fonctions. La défaillance est donc un état transitoire pouvant aboutir à une panne (cf. Figure II-6). Plusieurs classifications de défaillances (resp. pannes) ont été proposées [ZWI 95] :

- classification en fonction de la rapidité d'apparition (défaillance progressive ou soudaine);
- classification en fonction de l'amplitude (défaillance partielle ou complète) ;
- classification en fonction des effets (défaillance mineure, significative, critique ou catastrophique);
- classification en fonction des causes (défaillance première, seconde ou de commande).

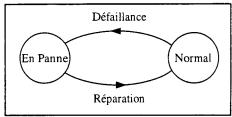


Figure II-6 : Processus de défaillance

Dans la suite, les défaillances considérées sont complètes. De plus nous considérons qu'une défaillance peut affecter une ou plusieurs fonctions d'une même ressource. Les pannes considérées sont complètes et permanentes. Elles persistent tant qu'une tâche de maintenance n'a pas eu lieu.

Les exemples concernant ce type de pannes sont nombreux. Nous citerons l'arrêt total d'une ressource dû à un dysfonctionnement d'un de ses principaux actionneurs ou du directeur de commande. Si, pour un convoyeur, qui autorise plusieurs transferts, un aiguillage se bloque dans une position, la panne est aussi complète et permanente, mais elle ne va pas forcement faire disparaître la totalité des transferts mis en oeuvre.

2.2.2 Actions sur la commande

Les actions sur la commande se répartissent en plusieurs types :

- le gel;
- la reprise ;
- la compensation ;
- la reconfiguration.

Le **gel** consiste à interdire d'envoyer des ordres de la commande au procédé. Le but est d'éviter de propager la panne. Ce gel peut être soit implicite, soit explicite. Dans le premier cas, le compte rendu d'évolution du procédé n'est pas remonté à la commande, ce qui empêche l'évolution de cette dernière. Il est explicite grâce à l'utilisation d'un processus de verrouillage

CH: PITRE II: Vers une approche de la supervision par le recouvrement

[SAH 92]. Ce mécanisme, intégré au niveau des modèles de commar le, se traduit comme une condition d'envoi de la commande.

La **reprise** consiste à reprendre le traitement à partir d'un état stable précédent ou postérieur à l'erreur [AUS 94].

Le but des deux derniers types d'actions consiste à poursuivre de façon continue la production sans remettre en cause les objectifs. On parle alors d'accommodation.

La compensation ou l'annulation des effets des défauts se fait par ajustement du régulateur du système ou du sous système contenant l'élément défaillant. Nous citerons par exemple le cas de la commande robuste d'un actionneur qui, suite à une dégradation, doit fournir un effort plus important afin de réaliser son mouvement. Les paramètres de régulation sont modifiés afin d'alimenter le moteur avec un courant plus important.

La reconfiguration de la commande modifie la structure de la commande par le remplacement d'un module de commande par un autre, sans pour autant que le procédé soit à l'arrêt. La reconfiguration correspond à l'exécution d'une autre séquence possible de commande. Elle peut être réalisée en reparamétrant la commande, ou en téléchargeant un nouveau programme de commande. Ce dernier cas concerne plus particulièrement la commande locale des ressources.

Généralement, la compensation et le gel sont des actions immédiates de façon à être réactif. La compensation peut être de longue durée. Le gel est suivi soit d'une reprise, soit d'une reconfiguration qui sont des actions différées.

2.2.3 Actions sur le procédé

Les actions sur le procédé sont couplées à certaines actions de la commande précédemment décrites. L'impact de ces actions est significatif sur le procédé. Ce type d'action fait intervenir un changement de mode d'au moins une ressource, comme l'arrêt ou la mise en marche d'une ressource. L'intervention de la gestion des modes est nécessaire pour leurs réalisations.

On distingue deux types d'actions : les actions immédiates et les actions différées. Les actions immédiates se justifient par des impératifs de rapidité d'action souvent liés à la sécurité du système. Elles seraient suffisantes si leur efficacité du point de vue disponibilité était admise. Or dans l'urgence rien d'optimal ne peut être élaboré. Il faut laisser un temps de calcul au système pour lui permettre de décider de la stratégie à adopter et d'appliquer les actions différées.

2.2.3.1 Actions immédiates

Les actions immédiates sont des procédures prédéfinies, exécutées pour certains types de défauts. En cas de défauts jugés critiques par la fonction de classification de la détection, la première action est une procédure d'urgence. Ces procédures sont à rapprocher du comportement réflexe.

De façon à accroître la réactivité, ces actions sont exécutées juste après la classification du symptôme, ce qui permet d'agir pendant la phase, souvent longue, de diagnostic (cf. Figure II-3). Par exemple, un dépassement de l'effort de coupe admissible est détecté sur un tour. Afin d'éviter la rupture de l'outil, l'action d'urgence consiste à écarter immédiatement l'outil. Puis, une série d'actions immédiates prédéterminées, pour le cas d'une pièce mal usinée, est exécutée : arrêt du tour, déchargement du tour par le robot de chargement, évacuation du produit mal usiné, mise du tour en arrêt tension-off. Ensuite, à partir des résultats du diagnostic, des décisions élaborent des actions de type différé afin de rendre disponible la fonction de transformation mise en oeuvre par le tour.

Le principal intérêt des actions immédiates est la rapidité de réaction. Elles sont cependant limitées par le fait qu'il faut avoir prévu la défaillance. Comme une liste exhaustive des défaillances ne peut être dressée, des procédures d'urgences prédéfinies et appropriées ne peuvent s'appliquer à tous les types de défauts. Elles ne sont définies que pour certaines classes caractéristiques de défauts.

2.2.3.2 Actions différées

Les actions différées ont pour objet principal d'assurer un maintien du niveau de production planifié satisfaisant. La décision du type d'action à appliquer dépendra de la connaissance de la durée d'indisponibilité de l'entité défaillante et des potentialités de l'architecture du SFPM. Pour cela, le recouvrement nécessite donc une connaissance globale du système.

Trois types d'actions se distinguent :

- 1. Arrêt complet du système et réparation de la ressource en panne ;
- 2. Marche dégradée de la ressource affectée par la défaillance ;
- 3. Reconfiguration du SFPM.

Toutes les actions rentrent dans ces trois catégories. En effet, soit la ressource défaillante est arrêtée ou bien elle est mise en mode de fonctionnement dégradé. Dans la première situation, le système tout entier est arrêté (cas 1) ou il est réorganisé (cas 3). Le cas du système fonctionnant sans la ressource en panne rentre dans le cas de la reconfiguration. Dans

la seconde situation, le système fonctionnant avec la ressource en mode de fonctionnement dégradé reste dans son organisation initiale (cas 2) ou est réorganisé (cas 3). Le choix d'une solution par rapport à une autre va dépendre des possibilités offertes par l'architecture du SFPM (voir la partie B relative à la tolérance), des objectifs de production et de la nature de la panne.

2.2.3.2.1 Arrêt / réparation

Cette solution consiste à arrêter le SFPM dans un état déterminé. Les usinages en cours sont achevés et aucune pièce n'est transférée. Puis, la réparation de la ressource en panne est exécutée par une équipe de maintenance corrective. Une fois la réparation effectuée, le système reprend sa production. La reprise de la production est assez simple étant donné qu'elle a lieu au point où la production a été stoppée. Rien n'a évolué pendant que le SFPM a été arrêté. L'ordonnancement n'est donc pas désynchronisé, ce qui présente un certain intérêt étant donné le temps nécessaire à son élaboration.

Comme indiqué Figure II-7, l'arrêt / réparation revient à décaler dans le temps l'ordre de passage de tous les produits. Il équivaut à propager de façon linéaire le retard dû à la panne à toutes les pièces passant ou devant passer par le SFPM. Ceci est l'inconvénient majeur de cette solution. Du point de vue des produits, elle ne limite pas l'ampleur de la défaillance. Ce choix s'avère acceptable, par rapport aux autres solutions lorsque le temps d'intervention nécessaire à la réparation de la ressource en panne n'est pas trop long.

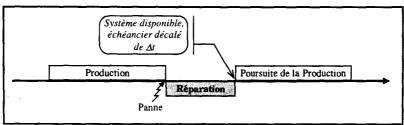


Figure II-7 : Principe de l'arrêt / réparation

2.2.3.2.2 Marche dégradée de la ressource

Cette solution intervient lorsque la ressource peut encore fonctionner, avec des performances réduites, après apparition de la défaillance. Par exemple, lorsque le seuil d'usure d'un outil de coupe est atteint, il faut réduire la vitesse et l'effort de coupe, ainsi que l'épaisseur des passes, ce qui allonge le temps d'usinage.

La ressource est mise en mode de fonctionnement dégradé "temporel" et la commande continue à la solliciter pour la production en cours. La réparation ne s'effectuera qu'une fois la production achevée. Les modifications de l'ordonnancement ne concernent que l'affectation temporelle et non spatiale. Par exemple, si une ressource, affectée par une défaillance, est

mise en mode dégradé "temporel", les autres ressources continuent à réaliser les fonctions qui leur sont attribuées sur les produits, en respectant l'ordre de passage prévisionnel. Les marges disponibles pour chaque produit sont consommées afin de palier au retard dû au passage sur la ressource dégradée.

Le mode dégradé "temporel", s'il est possible, est utilisé lorsque la notion de service à rendre est primordiale. Prenons l'exemple d'un TGV lorsque se révèle à mi-parcours un problème au niveau d'un essieu. Si la sécurité des voyageurs n'est pas mise en cause, la SNCF préfère faire circuler, à vitesse réduite, le train afin d'acheminer, même avec du retard, les voyageurs vers la destination prévue. Ce mode n'est donc pas à négliger pour finir des productions impératives. Tout dépend aussi d'autres facteurs comme des contraintes de qualité fixées pour le produit. Des études ont montré que le passage en mode dégradé donne des résultats satisfaisants lorsqu'il ne reste plus beaucoup de pièces à produire [RAM 96].

Il faut cependant noter que cette solution ne concerne que les défaillances progressives. Dans le cas de défaillances complètes, le SFPM poursuit sa mission en reportant la charge de la ressource défaillante sur d'autres ressources, ce qui rentre dans le cadre de la reconfiguration.

2.2.3.2.3 Reconfiguration du SFPM

La reconfiguration consiste à utiliser les flexibilités de l'architecture du SFPM afin de palier à la disparition des services assurés par la ressource en panne. Sa mise en oeuvre repose sur la disponibilité de ressources assurant les services manquants ainsi que sur celle du système de transport permettant le transfert des pièces vers ces ressources. Elle nécessite aussi une reconfiguration de la commande et peut obliger à une révision du plan de production en cours.

Remarque: La reconfiguration nécessite que l'architecture possède une certaine flexibilité potentielle, c'est-à-dire qu'elle possède des degrés de liberté suffisants pour pouvoir réagir. Cette caractéristique, que nous désignons sous le terme de tolérance aux pannes, est développée et étudiée en partie B.

Les options prises en cas de reconfiguration sont moins optimales que pour la configuration initiale. En effet, cette configuration initiale du SFPM est fournie par l'ordonnancement. Elle est fondée sur une optimisation quasi-complète considérant l'ensemble des potentialités du SFPM non défaillant. La reconfiguration fournie par le recouvrement est basée sur une architecture réduite, possédant des éléments défaillants. Si la reconfiguration permet toujours

au SFPM de délivrer les services requis, ces derniers sont forcément fournis avec des performances moindres.

Prenons l'exemple d'un SFPM constitué de deux tours identiques, T1 et T2, en parallèle. Pour la production en cours, chaque tour est utilisé à 80% de ses performances (redondance active). Lorsqu'une panne survient sur T1, la nouvelle configuration consiste à utiliser T2 à 100%. Les cadences de production sont inférieures à celles initialement prévues. Mais le SFPM continue à produire pendant la réparation de T1.

Le but des actions de reconfiguration est de réduire le temps d'indisponibilité du SFPM. Dans certains cas où la production est déjà avancée et où le temps de reconfiguration ne demande pas un calcul long [RAM 96], on préférera faire fonctionner le système dans une autre configuration et lancer parallèlement une procédure de maintenance plutôt que de laisser le système inactif et d'attendre la réparation de la panne (cf. Figure II-8). Ce temps d'indisponibilité est bien sûr fonction de l'ampleur de la défaillance et des buts privilégiés par la procédure de recouvrement. La reconfiguration permet donc de limiter les conséquences de la défaillance à un nombre réduit de pièces par rapport aux pièces prévues dans le plan de production.

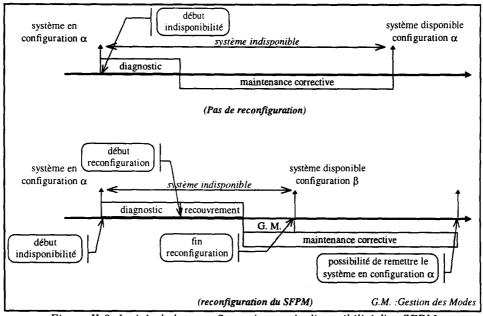


Figure II-8: Intérêt de la reconfiguration sur la disponibilité d'un SFPM

La reconfiguration de l'architecture, avec inclusion ou non des ressources défaillantes, ainsi que l'impact sur le plan de production, sont détaillés dans la partie C.

<u>Conclusion</u>: Cette section vient de dresser un panorama des types de décisions associées au recouvrement. Ces derniers vont du très court terme, pour les procédures d'urgence préprogrammées, au court terme. Les décisions relatives au court terme sont fondées sur un

CHAPITRE II: Vers une approche de la supervision par le recouvrement

nombre restreint de critères techniques (disponibilité des ressources, des fonctions d'usinage, ...) et sur quelques critères économiques (temps de production). Elles aboutissent à une sous-optimisation du SFPM. L'optimisation complète est du ressort de l'ordonnancement, prenant en compte de nombreux critères économiques ainsi que l'aspect prévisionnel. Il intervient dans le cadre d'une décision à plus long terme.

Il est vrai que les objectifs du recouvrement et de l'ordonnancement sont assez proches, mais ils ne s'appliquent pas dans le même contexte. Le recouvrement va en effet chercher à assurer la continuité du plan de production. Du fait d'impératifs liés au temps de réaction (le SFPM est en effet hors production pendant l'élaboration de la décision), le recouvrement ne considère pas un ensemble important de paramètres à optimiser, comme le ferait l'ordonnancement global qui, rappelons le, est souvent calculé hors-ligne pour le système complet. La solution du recouvrement ne sera donc pas forcément optimale. Elle sera néanmoins meilleure que l'arrêt complet du SFPM. Nous considérons que le recouvrement doit d'avantage s'intéresser à la faisabilité d'une gamme dans une optique de disponibilité qu'à l'optimisation qui interviendra dans un deuxième temps.

Dans la suite, nous nous intéresserons à l'aspect décisionnel à court terme.

3. Recouvrement et modèle de la partie opérative

Dans notre approche, le recouvrement décide des options à prendre après occurrence d'une défaillance. Nous avons vu que ce rôle de décision quant à la stratégie à appliquer requiert un besoin en informations concernant les produits circulant dans le SFPM, la commande, et l'architecture. Le recouvrement doit avoir une connaissance exhaustive du SFPM, à la fois, au repos et en fonctionnement. Les informations qu'il ne peut pas directement obtenir à partir des autres fonctions du contrôle/commande, devront être calculées à partir de ses propres outils.

Après avoir montré la nécessité d'avoir un modèle pour le recouvrement, nous étudions les contraintes imposées à ce modèle afin d'en déterminer les éléments de base. Le modèle complet sera dévoilé dans les parties suivantes (B et C) du mémoire. Notre hypothèse se place dans le cadre d'un recouvrement ayant une vision globale de l'ensemble du SFPM.

3.1 Besoin d'un modèle

Barbier [BAR 92] a montré que la définition d'un modèle de base sur lequel s'appuient les différentes méthodes de gestion est une condition de définition d'un système de décision. Ni le contrôle / commande, ni d'autres modules ne peuvent fournir la totalité des informations nécessaires au recouvrement. Soit ces informations sont spécifiques au recouvrement et ne sont donc pas gérées par d'autres modules. Soit, en présence de défaillances, ces modules ne sont plus opérationnels ou remontent une vision erronée du système. Il nécessairement que le recouvrement ait son propre système informationnel, s'appuyant sur une modélisation spécifique et donc complémentaire par rapport aux autres modèles définis dans des contextes différents (cf. Figure II-9).

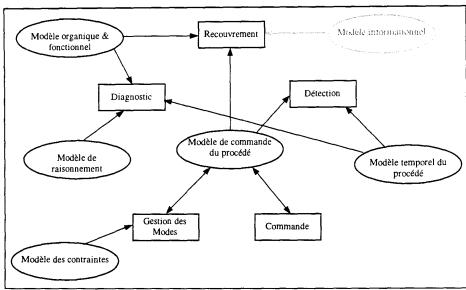


Figure II-9: Les modèles pour la supervision

A partir des informations nécessaires au recouvrement nous montrerons les insuffisances des modèles, développés dans la méthodologie CASPAIM, pour représenter l'ensemble des informations. Nous verrons qu'il existe une carence concernant un modèle représentant globalement certains aspects structurels, fonctionnels et opérationnels de la partie opérative, dans une optique spécifique au recouvrement.

3.1.1 Informations nécessaires au recouvrement

Au moment de la défaillance, le recouvrement requiert des informations sur l'état de la partie opérative et des produits présents dans le système. Afin d'élaborer sa décision, il doit aussi connaître les capacités du SFPM. Il doit entre autres connaître les ressources disponibles, les fonctions encore réalisables, les activités des différentes ressources ainsi que certaines de leurs caractéristiques comme la durée opératoire. Il peut de plus exister dans le SFPM des ressources, comme les postes de litiges, qui ne seront utilisées que dans le cas d'une panne. Ces postes, servant à vérifier si une pièce a, ou non, été correctement usinée, devront être connus du recouvrement alors qu'ils ne le seront pas forcément de la commande en fonctionnement normal.

Les connaissances requises concernent donc principalement l'architecture et se déclinent en terme de vision à la fois fonctionnelle et organique intégrant l'aspect potentialité et l'aspect exploitation par la prise en compte des produits présents et à venir.

3.1.2 Insuffisances des modèles existants

La modélisation de la partie opérative est une étape nécessaire dans le cadre de la conception, voire de l'exploitation des SFPM [VER 93]. Des modèles, s'intéressant à certains aspects de la partie opérative, ont déjà été développés. La connaissance approfondie du procédé sur laquelle repose le recouvrement peut être en partie mémorisée dans ces modèles. Cependant, ces modèles déjà définis et utilisés pour certaines fonctions du contrôle / commande, adoptent des décompositions et des structurations propres du fait de la spécificité de leur utilisation. Ils ne répondent donc que partiellement aux besoins du recouvrement.

Parmi les modèles de commande élaborés, le modèle GOE [AMA 94] ne prend pas en compte les éventuelles flexibilités de routage. Le graphe de commande [HUV 94] les prend en compte mais reste local à la ressource et n'a donc pas la vision globale souhaitée de l'architecture. De plus ces modèles considèrent principalement l'axe commande vers procédé et ne sont pas adaptés pour l'activité de réaction face à une défaillance de la supervision (§ 1.2.3).

Le modèle COD [KER 96] proposé pour la Gestion des Modes reste très lié à la commande, ce qui en fait, comme pour la commande, un modèle trop restrictif des possibilités du procédé. En effet, son obtention passe par la définition de la GL et reste lié à un type de production donné.

Les modèles développés pour la détection et le diagnostic (Modèle GF, OCE) [TOG 92], [ELK 93], restent assez locaux et ne modélisent pas les flexibilités de l'architecture du point de vue organisationnel.

Le modèle d'accessibilité [AMA 94] représente bien les différentes zones auxquelles un produit peut accéder. Une partie des potentialités de l'architecture est ainsi transcrite. Il aurait pu être utilisé si sa préoccupation ne s'était pas restreinte uniquement au domaine organique. En effet, il ne montre pas assez les flexibilités d'architecture du point de vue redondance fonctionnelle.

Tous ces modèles sont complémentaires. Ils permettent de traiter des aspects spécifiques du système de production. Mais ils n'ont pas été élaborés pour être intégrés dans une même démarche de conception et sont relativement disjoints. Il est ainsi difficile de les utiliser

conjointement. Ainsi, si nous désirons ajouter des traitements spécifiques dans le but de mettre à jour des informations caractéristiques du recouvrement, nous aboutissons à une modélisation spécifique. Il nous apparaît donc nécessaire d'établir un nouveau modèle répondant à un point de vue spécialisé afin de traiter la fonction de recouvrement.

3.2 Objectifs et contraintes du modèle

3.2.1 Objectifs associés au modèle

L'objectif principal du modèle est de permettre au recouvrement de disposer de critères rationnels pour déterminer, après occurrence d'une défaillance, quelle stratégie adopter, parmi celles énoncées dans la section précédente. Il doit notamment permettre d'étudier les répercussions d'une panne d'un élément du SFPM sur l'architecture de ce dernier afin de prendre des décisions concernant les ressources et ou les gammes à mettre en oeuvre. Un objectif secondaire sera aussi de savoir si l'architecture actuelle peut permettre, par ses flexibilités, de réagir face à une panne. Cette condition nécessaire à l'application d'une procédure de reconfiguration est étudiée dans la partie B relative à la tolérance des architectures flexibles.

Les besoins en intégration énoncés plus haut vont se trouver répercutés au niveau des informations nécessaires au recouvrement. L'intégration proposée autour du concept de supervision sera donc une intégration par les données, centrée sur le recouvrement. Ce centre de décision devient prépondérant pour l'activité de supervision lorsqu'une défaillance perturbe la marche du système. Ce type d'intégration par les données va nous amener à demander que la modélisation soit liée à un système d'information ouvert. Cette approche est à mettre en parallèle avec le modèle canonique de Le Moigne [LEM 91] pour les systèmes complexes (Figure II-10).

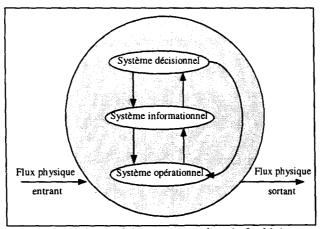


Figure II-10: Modèle canonique d'après Le Moigne

3.2.2 Contraintes requises

L'objectif de la modélisation est d'obtenir la représentation la plus adéquate de la partie opérative, pour le recouvrement. Les contraintes requises pour le modèle se répartissent en deux catégories : les contraintes dépendant des caractéristiques demandées à tout type de modèle et les contraintes dépendant des objectifs fixés pour le modèle.

La première catégorie, générique, se résume en :

- la transparence : le modèle est facile à comprendre et représente exactement les connaissances du monde réel à un niveau d'abstraction donné ;
- la validité : le modèle est exempt d'erreur de conception ;
- l'évolutivité : les modifications apportées au modèle n'accroissent pas la complexité de ce dernier.

La deuxième catégorie se résume en :

- ouverture du point de vue informationnel : le modèle doit pouvoir facilement recevoir les informations provenant des autres modèles ;
- indépendance vis à vis de la commande : le modèle doit être totalement indépendant de l'exploitation qui est faite du procédé. Il enregistre les modifications subies par le procédé au fur et à mesure de son évolution ;
- représentation des potentialités de l'architecture : le modèle doit pouvoir représenter les flexibilités d'architecture définies au chapitre I §1.2.2.

De plus, le modèle ne doit donc pas avoir une représentation trop fine du monde, qui, par sa complexité, serait incompatible avec une utilisation en exploitation. Il devra prendre en compte la flexibilité d'architecture du SFPM et notamment les ressources polyvalentes, les flexibilités de routage, l'organisation des ressources. La prise de décision du recouvrement est en partie fondée sur ces aspects du SFPM. Le modèle sera ouvert du point de vue informationnel pour que les caractéristiques de la supervision apparaissent, afin de faciliter l'intégration du recouvrement dans le projet CASPAIM.

Le modèle s'appuiera sur un système d'information. Le rôle du recouvrement étant essentiellement décisionnel, il n'est pas nécessaire que le modèle possède des primitives d'acquisition propres, ni de mise en oeuvre (pas de commande directement implantée). Ce rôle sera assuré par d'autres fonctions du contrôle / commande (Gestion des Modes, Surveillance, ...).

Le modèle est couplé à la commande mais reste indépendant. En effet, nous voulons qu'il garantisse une couverture importante des services offerts par le SFPM, sans restriction par une éventuelle utilisation.

D'après la finalité du modèle, il n'est pas nécessaire qu'il ait une dynamique propre. Le modèle représentera des informations qui peuvent évoluer dans le temps en raison de la dynamique des sources d'informations dont elles sont issues. Il est donc considéré comme statique. Dans notre approche, l'aspect dynamique a déjà été modélisé dans le système de commande à l'aide de réseaux de Petri. Ce point sera considéré lors du choix de l'outil support du modèle.

3.3 Vers un modèle

Nous souhaitons que toutes les données soient regroupées dans un seul et même modèle afin de constituer une base qui soit rapidement exploitable pour le raisonnement du Recouvrement. Mais nous n'envisageons pas l'obtention d'un modèle universel. En effet, si l'on se réfère à la littérature, de nombreux modèles ont été utilisés. Gunasekaran [GUN 95] donne un éventail assez large des différents types de modèles utilisés pour représenter les SFPM (du modèle de conception au modèle d'implantation en passant par les modèles opérationnels ou basés sur l'intelligence artificielle). Cette diversité montre qu'il est utopique de rechercher un modèle universel.

Nous référant à la Figure II-10, nous proposons de développer un modèle pour le recouvrement qui soit basé sur un système d'information (SI). Selon Rolland [ROL 86], un SI est un artefact greffé sur un objet (naturel) qui peut être une organisation de production. Il est conçu pour mémoriser un ensemble d'images de l'objet réel à différents moments de sa vie ; ces images sont accessibles par les modules de gestion de l'organisation qui s'en servent pour décider des actions à entreprendre dans les meilleures conditions. Le SI se révèle intéressant compte tenu de nos objectifs d'intégration et de notre définition du recouvrement comme centre de décision.

3.3.1 Hypothèses de modélisation

Ces hypothèses découlent des contraintes précédemment dégagées et de l'aspect forcément réducteur d'une modélisation.

Le niveau de granularité est fixé par les hypothèses liées aux données nécessaires au recouvrement (service rendu par le SFPM, organisation de l'architecture, ...). Il doit faire apparaître la fonction au sens fonction d'usinage ou fonction de transfert sans détailler la

nature précise du processus à mettre en oeuvre. Il n'est donc pas nécessaire de s'intéresser au niveau composant de la ressource. Le niveau retenu sera le suivi des tâches sur produits, lié avec le niveau coordination de la commande selon CASPAIM.

Les éléments tels que les outils, les coupleurs de communication ne sont pas considérés. De façon plus générale, la modélisation ne s'intéresse pas à l'architecture informatique. Elle ne considère que les ressources, leur fonctionnalités et leur organisation au sein du SFPM.

Les défaillances sont complètes. Elles entraînent la disparition de la fonction requise. D'autres travaux, fondés sur une surveillance indirecte par le flux, faisant référence à la maintenance prédictive [LY 97], prennent en compte les dégradations.

3.3.2 Principe adopté

Le principe adopté est le suivant (cf. Figure II-11). Nous définissons des éléments de référence modélisant la partie opérative (ensemble d'éléments d'information). Ces derniers intègrent différents points de vue et reçoivent des informations provenant d'autres modèles déjà établis. Ces informations sont mémorisées par l'intermédiaire de caractéristiques associées aux éléments de référence. Puis, un modèle représentant les aspects organisationnels du SFPM, avec une finalité recouvrement, est construit à partir de ces éléments de référence. Cette démarche d'obtention du modèle s'intègre dans la démarche plus générale proposée pour la conception de la supervision dans CASPAIM (cf. Figure II-4), au niveau de la phase de spécification de la partie physique.

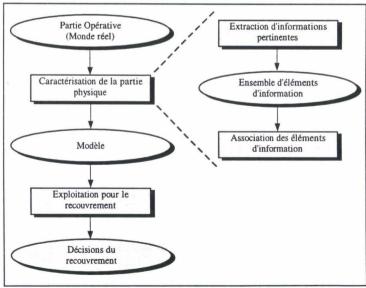


Figure II-11: Démarche d'élaboration du modèle

Afin de mettre en évidence le bien fondé des concepts introduits, ce modèle ne sera pas directement présenté. Il sera construit tout au long du mémoire afin de montrer clairement comment il permet de répondre à chacun des besoins énoncés pour le recouvrement.

3.3.3 Définitions et terminologie associées aux briques de base du modèle

La démarche vise à obtenir une représentation du SFPM sous forme d'entités, intégrant des propriétés structurelles ou organiques, fonctionnelles et opérationnelles. Nous nommons ces entités **Opérations**. Comme ce terme a été utilisé dans de nombreux travaux avec des significations légèrement différentes [AMA 94], [CHA 94], [BER 95], [TAW 95], [KER 96], nous en donnons une définition afin de le positionner avec précision.

3.3.3.1 Concept d'opération

<u>Définition</u>: Une opération est une fonction réalisée sur un produit par une ressource compte tenu de sa situation spatiale au sein du SFPM [BER 97/a]. Autrement dit, c'est une fonction mise en oeuvre par une ressource lorsque la ressource est considérée comme un composant du SFPM.

Une opération rend ainsi compte du comportement d'une ressource vis à vis d'un produit. Nous remarquons qu'à un certain niveau d'abstraction, l'opération peut s'apparenter avec la notion d'activité développée au LAAS [COM 91]. Nous considérerons donc les événements début d'opération et fin d'opération.

Le concept d'opération faisant référence à la notion de fonction, nous en profitons pour rappeler ce que nous entendons par fonction.

<u>Définition</u>: Une fonction est un service assuré par un système. Dans notre cas, le système considéré est le SFPM.

Ce concept, introduit avec un point de vue producticien, a été spécialisé relativement aux besoins. Il nous permet de définir plusieurs types de fonctions :

- la fonction de type transformation modifie l'état d'un produit. Citons par exemple, l'usinage réalisé par enlèvement de matière, l'emboutissage, par déformation de la matière et l'assemblage, par réunion et liaison de plusieurs pièces. Les paramètres représentatifs dépendent du type de procédé (pour un taraudage, par exemple, sont précisés la longueur, le diamètre, les paramètres de coupe, ...);
- la fonction de type contrôle permet de vérifier certains paramètres d'une pièce. Les paramètres susceptibles d'être contrôlés caractérisent cette fonction;
- la fonction de type transfert change la position où se situe une pièce. La caractéristique d'une telle fonction est son lieu de départ et son lieu de destination;
- la fonction de type stockage en un lieu donné;

la fonction de type libre passage en un lieu donné. Prenons l'exemple de la zone Z4 du convoyeur de la Figure II-12, nous n'obtenons pas le même comportement si la butée est en position sortie ou rentrée. Dans le premier cas, la pièce est stoppée et peut être chargée par le robot. Dans le second cas, la pièce continue son parcours sur le convoyeur. Le libre passage caractérise ce second cas.

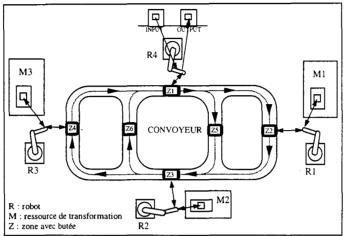


Figure II-12 : Exemple de cellule flexible

La spécialisation des fonctions est réalisée selon la démarche de la Figure II-13. Il faut noter qu'elle n'est pas si détaillée pour les fonctions de type transformation et contrôle que pour les autres types. Ceci vient du caractère particulier des ces deux premiers types. Ils traduisent l'essence même du SFPM, qui est caractérisé par sa capacité à délivrer des fonctions de type transformation, voire contrôle, en des lieux différents. Les autres types peuvent être considérés comme subalternes. Ils n'existent que par rapport aux précédentes fonctions, et nécessitent d'être plus détaillés en prenant en compte des notions relatives aux lieux.

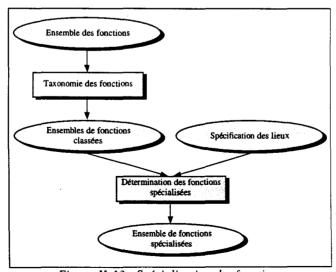


Figure II-13: Spécialisation des fonctions

A partir de ces définitions, nous citons quelques exemples d'opérations :

• Opération de fraisage (avec les paramètres ...) sur le centre d'usinage CU;

- Opération de transfert du lieu L_{orig} vers L_{dest} par le robot R;
- Opération de stockage en un lieu L. Si le stockage ne nécessite pas l'intervention d'une ressource, la ressource réalisant l'opération est par convention le lieu.

3.3.3.2 Propriétés liées aux opérations

Nous insistons tout d'abord sur quelques précisions terminologiques. Il convient, en effet, de noter la distinction entre fonction et opération (cf. Figure II-14). Les opérations sont définies au niveau ressources. Les fonctions sont définies au niveau du système global. Une **ressource réalise une opération.** Elle peut réaliser plusieurs opérations dans le cas où elle admet différentes fonctionnalités (cas des ressources polyvalentes). Une **opération met en oeuvre une fonction**. Plusieurs opérations peuvent mettre en oeuvre la même fonction au sein de SFPM. A des dates différentes, l'une ou l'autre de ces opérations met en oeuvre la fonction considérée. C'est le cas où plusieurs ressources redondantes exécutent une même fonction. La Figure II-14 montre que la fonction f₃ est mise en oeuvre à la fois par les ressources R1 et R2 du SFPM considéré.

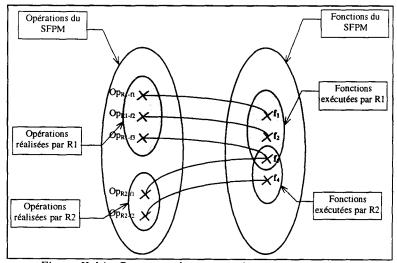


Figure II-14: Correspondance entre fonctions et opérations

D'un point de vue mathématique, une opération est une **relation** binaire entre l'ensemble des ressources et l'ensemble des fonctions. Cette relation peut se représenter par un treillis (cf. Figure II-15). Une opération sera notée Op_{Ri-fj} . Ri fait référence à la ressource, fj fait référence à la fonction.

CHAPITRE II: Vers une approche de la supervision par le recouvrement

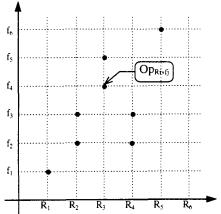


Figure II-15: Représentation de la relation opération

L'ensemble des opérations Σ_{op} peut être partitionné selon la fonction mise en oeuvre. La fonction est donc vue comme un ensemble d'opérations (cf Figure II-15 : ligne horizontale). Si, dans cet ensemble, un élément disparaît et que cet ensemble continue d'être non-vide, alors la fonction continue d'exister pour le SFPM. La fonction disparaît uniquement quand l'ensemble est vide. Il est ainsi intéressant, dans l'optique du recouvrement, de noter que la disparition d'une opération n'entraîne pas obligatoirement la disparition de la fonction correspondante.

$$\begin{split} & \Sigma_{op} = \left\{ op_{Ri-fj} \: / \: (i,j) \in \: N^2 \right\} \\ & F_j = \left\{ op_{Ri-fj} \: / \: f_j \: \: fix\acute{e} \: et \: i \in \: N \right\} \end{split}$$

Les mêmes considérations s'appliquent aussi aux ressources. On obtient un deuxième type de partition. Ces propriétés seront utilisées en partie B où un exemple complet sera présenté.

$$R_{i} = \left\{ op_{Ri-fj} / R_{i} \text{ fixé et } j \in N \right\}$$

A partir de ces partitions, nous définissons, Figure II-16, deux fonctions de classification (au sens mathématique du terme). Cl_f associe, à chaque opération, la fonction qu'elle met en oeuvre. Cl_R associe, à chaque opération, la ressource qui la réalise. Ces fonctions de classification seront utilisées au chapitre IV, pour regrouper les opérations afin de construire complètement le modèle.

CHAPITRE II: Vers une approche de la supervision par le recouvrement

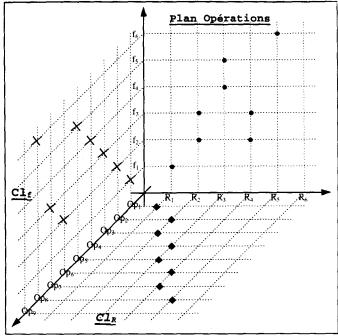


Figure II-16: Opérations et fonctions de classification associées

3.3.3.3 Typologie des opérations

Une taxonomie des opérations est maintenant présentée (cf. Figure II-17). Elle sera ultérieurement utilisée pour définir des règles d'agrégation des opérations en vue de construire notre modèle. La figure précise également les critères permettant de classer les types d'opérations. Seuls les types de base sont détaillés.

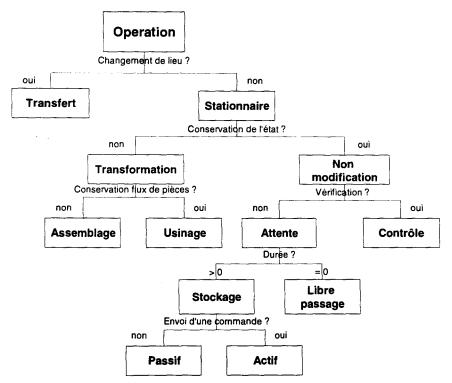


Figure II-17: Taxonomie des opérations

L'opération de type **transfert** met en oeuvre un changement de lieu physique du produit. Elle est exécutée par des éléments (robot de chargement/déchargement, partie de convoyeur) du système de transport. Nous soulignons qu'un convoyeur, qui offre la possibilité de relier plusieurs lieux, réalise plusieurs opérations de transfert. Les autres opérations sont de type **stationnaire**. Elles ont comme caractéristique un lieu unique de réalisation.

L'opération de type **usinage** met en oeuvre la transformation d'une pièce (tournage, fraisage...). La pièce en sortie correspond à la pièce en entrée transformée. Il y a conservation du flux. Une opération d'usinage se définit à partir du lieu d'usinage et de la fonction d'une ressource de transformation (Tour, Centre d'Usinage...).

L'opération de type **assemblage** réalise la production d'une pièce complexe à partir de pièces simples. La pièce en sortie est constituée de pièces arrivées en entrée de l'opération. Il n'y a pas conservation du flux. Une opération de ce type se définit à partir du lieu d'assemblage. Ces deux types d'opérations font partie d'un type plus général appelé **transformation**.

Le type **contrôle** vérifie les paramètres de transformation d'une pièce. Ce type d'opération est réalisé par des appareils de métrologie ou de contrôle optique (comme le contrôle du bon positionnement des composants sur une carte électronique). Il sera surtout utilisé par le recouvrement afin de déterminer les options à prendre pour les produits présents dans le SFPM lors de la panne.

Le type stockage se décompose en stockage actif et stockage passif. L'opération de type stockage passif met en oeuvre l'immobilisation d'une pièce sur un lieu physique. Elle est définie à partir d'un lieu physique pouvant recevoir un ou plusieurs produits qui ne subissent aucune transformation. L'opération de type stockage actif est similaire à l'opération de type stockage passif, à la différence près qu'une commande est requise pour la réalisation de l'opération. Ce type d'opération peut être réalisé par une butée en position sortie, sur un convoyeur.

L'opération de type **libre passage** est similaire à un stockage actif avec une durée nulle. Ce type d'opération est mis en oeuvre par une butée d'un convoyeur qui est rentrée et laisse passer le produit amené par la bande.

Les types décrits sont génériques. Ils permettent de définir des éléments réutilisables [GRA 95] et concourent à la définition rigoureuse de caractéristiques associées aux opérations. Par la suite, nous ferons référence principalement aux opération de type transformation, transfert, stockage, contrôle, et libre passage.

3.3.4 Caractéristiques élémentaires associées aux opérations

<u>Définition</u>: Une caractéristique exprime une propriété d'une opération. Elle peut évoluer en fonction des états de l'opération.

Nous définissons deux principaux types de caractéristiques :

- les caractéristiques **statiques** rendent compte des informations inhérentes à la structure et aux fonctions du SFPM sans tenir compte des pièces effectivement usinées par le système à un instant donné. Equivalentes à des valeurs par défaut, ces caractéristiques ne sont plus modifiées pendant la phase de production du SFPM. Elles pourront à la rigueur être changées pour la partie du SFPM mise hors tension. Ce sera le cas pour un changement manuel d'outil sur un centre d'usinage permettant un autre type d'usinage, ou pour la mise en place d'un nouveau matériel (nouveau robot, ajout de fonctionnalités à un équipement...);
- Les caractéristiques dynamiques rendent compte des informations relatives au comportement du SFPM en exploitation vis à vis des gammes proposées au système.
 Des caractéristiques de ce type pourront être modifiées pendant la production, lors de l'apparition d'une défaillance et lors d'une reconfiguration du SFPM.

Les caractéristiques peuvent être propres à chaque opération, mais sont aussi dépendantes des informations provenant d'opérations voisines. Elles pourront aussi être renseignées par des informations émanant d'autres modèles. Leur formalisation résulte de l'analyse des objectifs précédemment détaillés.

Selon Levis [LEV 94], les connaissances fonctionnelles et structurelles sont à la base de l'ingénierie des SFPM. Il est normal qu'elles soient déclinées au niveau des opérations grâce aux caractéristiques "Fonction" et "Support de réalisation". Toutes les caractéristiques présentées sont statiques.

La caractéristique "Fonction" rend compte de la nature de la fonction mise en oeuvre par l'opération (cf. fonction de classification Cl_f). Par exemple, "Fonction" peut prendre comme valeur {Transfert Z1 Z2} pour une opération de transfert de Z1 vers Z2 par le robot R. Elle peut prendre comme valeur {Taraudage, L, D} pour une opération de taraudage sur un centre d'usinage CU. "Fonction" va permettre de lister les opérations par fonction et de savoir s'il existe au moins une opération, non défaillante, mettant en oeuvre une fonction au niveau du SFPM.

La caractéristique "Support de réalisation" fait référence au nom de la ressource qui réalise l'opération (cf. fonction de classification Cl_R). Par exemple, "Support de réalisation" peut prendre comme valeur $\{R1\}$ pour un robot, $\{M1\}$ pour une ressource de transformation, $\{CV\}$ pour un convoyeur, ... Cette caractéristique va servir à répercuter la défaillance complète d'une ressource sur toutes les opérations qu'elle réalise.

Les caractéristiques suivantes dépendent du type d'opération. Pour les opérations de type transfert, les caractéristiques "Lieu d'origine", "Lieu de destination" sont définies. Pour les opérations stationnaires, la caractéristique "Lieu de réalisation" est définie.

Du point de vue de la commande et de la supervision, une opération peut être soit active, soit passive. Elle est active dans le cas où la mise en oeuvre de la fonction est tributaire de l'envoi d'une commande. Elle décrit donc le comportement dynamique d'une ressource. L'opération sera sujette aux défaillances (cette donnée pourra être transcrite par un taux de défaillances non-nul). L'opération est passive pour une ressource qui a un comportement statique. C'est le cas d'un stockeur constitué d'une zone de stockage simple. Le fait de déposer la pièce dans la zone réalise l'opération. Aucune commande n'est envoyée pour mettre en oeuvre la fonction sur le produit. Cette information est traduite par la caractéristique "Active" qui prendra une valeur booléenne.

D'autres caractéristiques seront ensuite définies de façon à pouvoir tenir compte des caractères propres à chaque modèle et partagés par le recouvrement [HUG 96]. La présentation complète des caractéristiques des opérations types est détaillée en annexes.

Dans la pratique, cet enrichissement progressif pourra être mise en place grâce au référentiel [BIG 97]. La démarche de présentation va de pair avec une démarche successive par ajustement [MIL 98], constituée d'une succession de phases dont le but est, à partir d'un modèle simple, d'enrichir pas à pas ce modèle tout en gardant trace de son évolution.

CONCLUSION

Comme défini au chapitre I, les SFPM exigent, du fait de leur complexité, une intégration forte. Celle-ci transparaît dans les différentes méthodologies CIM présentées. Au sein du projet CASPAIM, cette intégration apparaît autour du concept de supervision, qui contrôle et gère les différentes activités du SFPM de façon à garantir les objectifs de production en fonction des données de la planification / ordonnancement, des consignes des opérateurs, et de façon à empêcher les dérives du système commandé.

Une structuration de la supervision a été proposée au chapitre II. Elle nous a permis de préciser les deux activités de la supervision, à savoir : le fonctionnement dans un état déterminé et la réaction après occurrence d'une défaillance. Dans ce dernier cas, la prise en compte des défaillances nous a amenés à nous intéresser au recouvrement. Cette fonction devient, en effet, prépondérante dans un objectif de supervision, après occurrence d'une défaillance. Dans notre approche, le recouvrement détermine, pour le SFPM, le nouvel état à atteindre, que ce soit pour les produits, pour l'architecture (partie opérative), et pour la commande. La mise en oeuvre des décisions du recouvrement est réalisée par la gestion des modes et le pilotage.

De part les informations qu'il requiert, le recouvrement se place à une position relativement centrale vis-à-vis des autres fonctions de la supervision. Ces considérations montrent l'importance d'une telle fonction dans le processus d'intégration, répercuté au niveau des données. L'étude détaillée du recouvrement a révélé une carence au niveau des modèles existants. Nous avons donc défini un modèle propre au recouvrement. Etant donné le rôle décisionnel du recouvrement, ce modèle est principalement fondé sur un système d'information. Ce système d'information est lui même renseigné par un système informationnel constitué de la surveillance.

Des entités, en accord avec les prérequis établis tels que la transparence, la modifiabilité, l'ouverture, et l'indépendance vis à vis de la commande, ont été définies. Elles font partie d'un système d'information et traduisent les caractéristiques organiques et fonctionnelles de la partie opérative. L'approche adoptée a permis d'obtenir des éléments réutilisables. Cette phase constitue une première étape dans l'établissement du modèle. Ces opérations serviront de base à la construction du modèle, qui sera présenté dans les chapitres suivants.

Il faut remarquer que la sûreté de fonctionnement a été sous-jascente à la démarche. En effet, nous nous sommes intéressés à des SFPM sujets aux défaillances.

Selon Frank [FRA 96] et Laprie [LAP 95], deux approches permettent d'aller vers un système peu sensible aux fautes. L'approche passive consiste à concevoir le système de façon à ce que la panne d'un élément n'influe pas trop sur la marche générale du système. Nous détaillerons cette approche dans la partie B, relative à l'évaluation de la tolérance aux pannes de l'architecture du procédé. L'approche active, quant à elle, met en oeuvre un ensemble de réactions qui permettent de contrer l'effet de la défaillance sur le fonctionnement du SFPM. La reconfiguration, détaillée en partie C, fait partie de cette approche. Il faut remarquer que l'approche active est d'autant plus aisée que l'approche passive a permis d'obtenir une architecture pertinente.

En exploitation, le recouvrement est une approche a posteriori. En effet, ce n'est qu'une fois le SFPM conçu et commandé, que cette fonction intervient après détection et diagnostic d'une panne. La recherche d'intégration de la surveillance, puis de la supervision dans la démarche CASPAIM a montré la limite d'une telle approche [TOG 92], [CRA 94]. Il convient donc, avant de s'intéresser au recouvrement, de mener de front des travaux liés à la tolérance aux pannes lors de la conception de l'architecture et de son contrôle / commande.

Nous commencerons donc par aborder la partie relative à la tolérance aux pannes d'une architecture flexible.

PARTIE B

La tolérance des architectures flexibles

INTRODUCTION

Comme énoncé en conclusion de la partie A, cette partie présente l'approche passive, correspondant à l'utilisation de stratégies de conception robustes en vue de rendre le processus peu sensible aux pannes.

La question du choix des ressources et de leur agencement doit être résolu de façon précise tout au début de la conception du SFPM [GUN 95], [MAH 97]. Mis à part les facteurs relatifs à la distance, au temps de fabrication, au coût, il importe aussi de considérer les potentialités des ressources et de l'architecture en terme de fonctionnalités, d'espace de travail, d'accessibilité et de tolérance aux pannes.

La notion de tolérance a été abordée dans les domaines des systèmes informatiques (notion de tolérance aux fautes) [LAP 95] et de l'automatique (notion de robustesse). Nous l'avons adapté pour l'étude des SFPM.

L'objectif de cette approche est d'étudier, dans un cadre de sûreté de fonctionnement, les potentialités matérielles de l'architecture, de façon à concevoir un SFPM capable de réagir face à des pannes. Il est entendu que, par la suite, l'architecture représente l'architecture matérielle de production ou partie opérative.

Elle conduit, à terme, à faciliter le recouvrement. En effet, le recouvrement ne sera efficace que si le SFPM admet des degrés de liberté afin de répondre à des aléas. La tolérance est vue comme une condition nécessaire d'une bonne réaction face à une panne d'un élément du SFPM.

La tolérance est étudiée hors-ligne, de préférence lors de la conception du SFPM. L'expérience acquise a montré que le coût est multiplié par un facteur de 30 à 100 si l'intégration de la sûreté de fonctionnement est réalisée en phase d'exploitation, après occurrence d'une panne [WAR 95]. Il apparaît donc intéressant de prendre en compte des dysfonctionnements dès la conception [TOG 92], [SIM 98].

La partie B se compose des chapitres III, IV, et V.

Le chapitre III introduit la notion de tolérance aux pannes appliquée aux SFPM et la positionne dans le cadre de la sûreté de fonctionnement. L'approche proposée va à la fois s'intéresser à la tolérance du SFPM, vu dans sa globalité, ainsi qu'aux éléments critiques du système. Un élément critique se définit comme un élément dont la panne rend inutilisables une ou plusieurs fonctions de transformation du SFPM. Le chapitre montre aussi comment la

tolérance est liée à la disponibilité et quelles sont les méthodes jusqu'alors utilisées pour évaluer la disponibilité d'un système.

Le chapitre IV précise le modèle utilisé afin d'évaluer la tolérance d'une architecture. Ce modèle appelé Graphe d'Accessibilité Opérationnel (GAO) est un modèle entités / association, pour lequel une association particulière, la relation d'accessibilité, a été préférée. Les entités sont les opérations définies au chapitre II §3.3.3. Afin de réaliser simplement les traitements d'analyse de l'architecture, le modèle s'appuie sur un outil : le graphe orienté. La démarche progressive permettant de construire le modèle à partir d'une architecture existante ou spécifiée est ensuite présentée et illustrée.

Le chapitre V s'intéresse directement à l'évaluation de la tolérance d'une architecture modélisée par GAO. La détermination des entités critiques du SFPM est d'abord présentée. Notre approche considère l'impact de la disparition d'une entité en terme de disponibilité des fonctions de transformation du système. A ce titre, elle s'apparente à certaines études d'influence de pannes [GEN 96], mais elle n'est pas fondée sur la simulation. Sur la base de connaissance des entités critiques, des critères sont ensuite calculés. L'intégration de la méthode dans une démarche générale de conception est également précisée.

Quelques applications des critères précédemment définis sont ensuite exposées. Nous montrons comment des règles de conception, aboutissant à la définition d'une architecture tolérante, peuvent être déterminées. Nous indiquons aussi comment l'analyse quantitative de la tolérance donne une mesure de la flexibilité du SFPM. Nous précisons l'intérêt d'avoir une architecture tolérante, y compris du point de vue de la productivité.

Chapitre III:

Définition de la tolérance dans le cadre de la sûreté de fonctionnement

Si l'on se réfère à une définition sémantique du terme, la tolérance est vue comme la capacité d'un système à admettre des défaillances. Elle intervient comme un moyen visant à améliorer la sûreté de fonctionnement des systèmes. Comme nous venons de le voir, une démarche de tolérance implique de mettre en oeuvre différentes stratégies à la fois en conception et en phase d'exploitation [FRA 96]. La partie B s'intéressant exclusivement à l'approche en conception, ce chapitre présente la sûreté de fonctionnement des SFPM en s'axant principalement sur les démarches d'analyse hors-ligne.

Ce chapitre définit et positionne notre approche de la tolérance aux pannes des SFPM. Il spécifie tout d'abord le cadre d'application de notre démarche, à savoir la sûreté de fonctionnement des SFPM. L'accent est mis sur les études concernant la disponibilité des systèmes, ce qui permet de faire le point sur ces études et sur leur finalité. Quantitativement, ces méthodes vont s'intéresser à la disponibilité du système afin d'en déterminer les éléments sensibles. Notre approche de la tolérance est ensuite précisée. Elle s'intéresse à la fois à la vision globale du système et à ses éléments sensibles. Ce deuxième point de vue est abordé grâce à l'introduction du concept d'éléments critiques. Nous montrons aussi comment l'objectif des études de tolérance d'architecture va dans le sens d'un accroissement de la disponibilité des fonctions de transformation du SFPM, en soulignant le lien direct entre ces deux concepts.

1. La sûreté de fonctionnement des SFFM

Cette section vise à rappeler brièvement le concept de sûreté de fonctionnement ainsi que les notions de fiabilité, de disponibilité, de maintenabilité et de sécurité. Les notions de fiabilité et de disponibilité sont ensuite considérées dans le cadre des SFPM. Les nuances à considérer, par rapport à des évaluations de paramètres de sûreté de fonctionnement de systèmes simples, sont soulignées. Nous verrons que la caractéristique flexible de tels systèmes permet de différencier disponibilité de fiabilité, même si le système n'est pas réparable. Etant donné notre objectif de conception d'un système peu sensible aux pannes, l'aspect disponibilité est principalement considéré. Quelques méthodes permettant d'évaluer la disponibilité d'un système sont passées en revue.

1.1 Concepts de base

1.1.1 Définitions

La sûreté de fonctionnement va rendre compte de l'aptitude du système à remplir sa mission. Elle peut s'analyser selon quatre attributs fondamentaux : fiabilité, disponibilité, maintenabilité, et sécurité [VIL 88], [ZWI 95]. Ces attributs caractérisent des propriétés différentes mais complémentaires qui peuvent prendre plus ou moins d'importance selon les applications auxquelles le système est destiné.

Dans les définitions suivantes, l'entité E désigne un système ou un composant. P désigne la probabilité. Les notions de défaillance et panne ont été précisées au chapitre II §2.2.1.

La **fiabilité** (Reliability) : Aptitude d'une entité à accomplir une fonction requise, dans des conditions données, pendant un intervalle de temps donné. La fiabilité traduit une notion de continuité de fonctionnement.

R(t) = P(E non défaillante sur [0, t])

La disponibilité (Availability) : Aptitude d'une entité à être en état d'accomplir une fonction requise, dans des conditions données, à un instant donné, en supposant que la fourniture des moyens extérieurs nécessaires soit assurée.

A(t) = P(E non défaillante à t)

La maintenabilité (Maintenability) : Dans des conditions données d'utilisation, aptitude d'une entité à être maintenue ou rétablie, sur un intervalle de temps donné, dans un état dans lequel elle peut accomplir une fonction requise, lorsque la maintenance est accomplie dans des conditions données, avec des procédures et des moyens prescrits.

M(t) = P(E réparée sur [0, t])

La **sécurité** (Safety) : Aptitude d'une entité à éviter de faire apparaître, dans des conditions données, des événements critiques ou catastrophiques. Ces événements peuvent être critiques pour l'opérateur, le système ou son environnement.

Nous pouvons remarquer que la maintenabilité dépasse le cadre de la maintenance corrective. La prise en compte de paramètres de maintenance préventive fait l'objet de différents travaux [PEL 92], [PER 96], [SAS 97], [LY 97].

De part leur définition, fiabilité et disponibilité mettent l'accent sur l'évitement des pannes. Nous verrons comment les différencier dans le cadre des SFPM.

1.1.2 Moyens de mesure

A partir des attributs précédents sont définis des paramètres permettant de mesurer le degré de confiance à accorder au système. Nous citons les principaux :

- Le MTTF (Mean Time To Failure) représente la durée moyenne de fonctionnement avant la première défaillance ;
- Le MTBF (Mean Time Between Failures) représente la durée moyenne entre deux défaillances consécutives :
- Le MDT (Mean Down Time) représente la durée moyenne d'indisponibilité ou durée moyenne dans l'état défaillant ;
- Le MTTR (Mean Time To Repair) représente la durée moyenne de réparation.

Ces temps sont souvent issus de campagnes de mesures réalisées sur des ressources.

D'autres paramètres peuvent aussi être définis à partir d'une approche probabiliste. Bien souvent, la distribution de pannes est supposée suivre une loi exponentielle [PEY 69]. Les probabilités sont calculées à partir des taux de panne λ et taux de réparation μ des entités. Une analyse markovienne utilisant une classe de RdP stochastiques, présentée dans Daniel [DAN 95], permet de déterminer des indicateurs de sûreté de fonctionnement de ressources placées dans un contexte d'atelier série ou parallèle. Les attributs, énoncés au paragraphe précédent, sont calculés à partir d'indicateurs comme la probabilité de repos, de marche, de panne et d'arrêt pour maintenance.

1.1.3 Application de la sûreté de fonctionnement aux SFPM

La sûreté de fonctionnement a été définie pour un système quelconque. Ce concept a ensuite été adapté aux systèmes informatiques [LAP 95], aux systèmes électroniques, mécaniques [PAG 80], [VIL 88], [LYO 92]. Nous nous intéressons à son application dans le cadre des systèmes de production composés de plusieurs entités. Dans ce cadre, l'analogie

entre composant (mécanique, électronique) et ressource du SFPM n'est plus possible. Les différences viennent du fait que ces systèmes délivrent plusieurs fonctions de production. Ces fonctions sont le fruit de la coopération de plusieurs ressources de transfert et de transformation. Ces ressources sont intégrées dans une architecture dont l'organisation n'est pas simplement décomposable en série et parallèle. En plus de l'aspect routage, des redondances de ressources peuvent exister comme dans le cas des composants de cartes électroniques. Mais la redondance n'existe pas forcément pour toutes les fonctions exécutées par une ressource. Par exemple, si M1 exécute $\{f_1, f_2\}$ et M2 exécute $\{f_1, f_3\}$, il n'y a pas redondance de ressource, mais une mise en oeuvre différente de f_1 .

Dans l'exemple Figure III-1, si l'on considère que les ressources M1 et M2 exécutent des fonctions communes, l'aspect circulaire du convoyeur impliquera que le SFPM ne peut se décomposer selon une arborescence stricte, comme cela pourrait être le cas pour des systèmes simples. Plusieurs fonctions de structure [KAU 75] devront être utilisées en fonctions de points de vue différents.

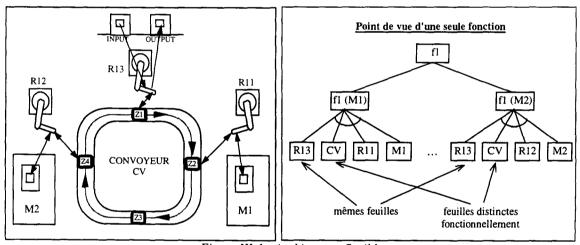


Figure III-1: Architecture flexible

L'évolution des technologies a permis une amélioration des performances. Mais, elle a aussi conduit à une augmentation de la complexité des systèmes (cf. chapitre I §1.3.3). Si la complexité entraîne une diminution de la fiabilité, les possibilités de traitement des défaillances, utilisant l'activité de réaction de la supervision ainsi que les flexibilités du SFPM, vont contribuer à l'amélioration de la disponibilité des services délivrés par le SFPM. Comme nous l'avons vu au chapitre II §1.1, cette activité de réaction est supportée par la supervision au travers des fonctions de détection, diagnostic, recouvrement et gestion des modes.

En fait, la distinction entre fiabilité et disponibilité, apparue avec la prise en compte du caractère réparable des entités, va encore s'accroître avec ce type de systèmes. En effet, même

si nous faisons abstraction de cet aspect de réparation des ressources, l'existence de flexibilités au niveau de l'architecture du SFPM induit une différence entre la probabilité que ce système puisse délivrer ses fonctions à t et la probabilité que ses éléments ne soient pas défaillants depuis la mise en service du système. La disponibilité du système n'est donc plus égale à la fiabilité de l'ensemble de ses éléments.

Par la suite, nous faisons abstraction du caractère réparable des ressources. Notre objectif, étant de concevoir une architecture qui soit peu sensible aux pannes, l'aspect délivrance d'un service par le SFPM devient primordial, ce qui nous conduit à nous rapprocher des études sur la disponibilité.

1.2 Etude de la disponibilité des systèmes

L'étude de la disponibilité a pour finalité de répondre à des questions du type :

- Quel élément faut-il améliorer en priorité ?
- Quel élément faut-il surveiller ?
- Sachant que le système est en panne, quel élément faut-il réparer en priorité ?

Ces études sont fondées sur différentes méthodes qui permettent de définir des critères donnant des éléments de réponse aux questions ci-dessus. Ces études ne prennent pas en considération de facteurs économiques. Elles devront donc être utilisées conjointement avec d'autres dans une optimisation multi-critères.

1.2.1 Méthodes et modèles utilisés

Les méthodes permettant d'évaluer la disponibilité d'un système sont à la fois qualitatives et quantitatives. Plusieurs types de démarches se distinguent. La démarche inductive étudie les conséquences d'une défaillance (AMDEC). La démarche déductive recherche les causes d'une défaillance donnée (arbres de défaillances). La démarche Markovienne va consister à modéliser les états du système et à en calculer les grandeurs probabilistes. Ces méthodes sont fondées sur l'utilisation de modèles [PAG 80], [VIL 88], [LYO 92].

1.2.1.1 AMDEC

L'Analyse des Modes de Défaillances, de leurs Effets et de leur Criticité (AMDEC) est une méthode inductive. Elle étudie systématiquement les effets des défaillances qui peuvent affecter les composants d'un système. A chaque mode de défaillance sont associées la probabilité d'occurrence et la gravité. Elle permet d'identifier les modes de défaillances ayant d'importants effets sur la disponibilité du système. L'AMDEC est surtout utilisée pour les

analyses de sécurité dans les industries à risques (nucléaire) et aéronautiques. Le but est de vérifier que certaines fonctions seront toujours disponibles.

1.2.1.2 Arbre de défaillances

Ce modèle est construit selon une méthode déductive. Il représente graphiquement, au moyen d'une structure arborescente, les différentes combinaisons possibles d'événements indésirables de base entraînant la réalisation d'un événement indésirable critique. Comme représenté Figure III-1, la racine de l'arborescence représente l'événement critique. Les feuilles décrivent les événements indésirables élémentaires, indépendants et probabilisables. Les noeuds intermédiaires expriment les événements composés résultant de la composition logique (ET logique, OU logique) des événements de niveau inférieur. Dans la Figure III-2, X1 représente la rupture de l'outil 1 sur un centre d'usinage, X2 représente la rupture de l'outil 2, X4 représente la rupture de l'outil 3. Ces outils sont considérés comme des outils de rechange. X3 correspond à une panne au niveau du sélectionneur d'outil du magasin. R1, R2 correspondent à une panne des éléments de rechange et EI est l'événement indésiré, à savoir l'impossibilité d'usiner avec le type d'outil.

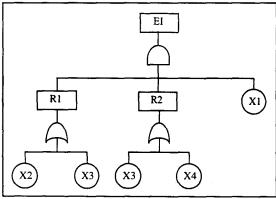


Figure III-2 : Exemple d'arbre de défaillance

Le calcul de disponibilité va reposer sur l'évaluation de la probabilité d'occurrence de l'événement racine compte tenu des valeurs de probabilité d'occurrence des événements feuilles. Il repose sur la recherche de coupes minimales, c'est-à-dire l'ensemble minimal d'éléments dont la panne entraîne la panne du système. Sur l'exemple Figure III-2, les coupes minimales sont {X1, X3} et {X1, X2, X4}.

A ce titre, l'outil Diagramme de Décision Binaires (DDB) accélère le calcul de disponibilité en permettant de trouver les coupes minimales des arbres de défaillance [CON 96]. Il permet en effet de représenter une fonction booléenne en utilisant récursivement la décomposition de Shannon associée. La fonction booléenne F associée à l'exemple, ainsi que sa décomposition de Shannon selon X1 sont données par les équations Figure III-3. Le DDB associé est représenté Figure III-4.

F(X1, X2, X3, X4) = X1.(X2+X3).(X3+X4). $F(X1, X2, X3, X4) = X1.F(1, X2, X3, X4) + \overline{X1.F}(0, X2, X3, X4)$

Figure III-3: Décomposition de shannon de la fonction F

Cependant, l'exploitation quantitative du DDB, utilisant des calculs de probabilité d'occurrence d'événement, est plus ou moins aisée. Elle dépend en grande partie de la construction du diagramme. Or, cette dernière dépend de l'ordre dans lequel les variables binaires sont considérées [BON 96]. Ils restent, pour l'instant insuffisants pour les calculs relatifs à la fiabilité (MTTF et MTTR) [SCH 96].

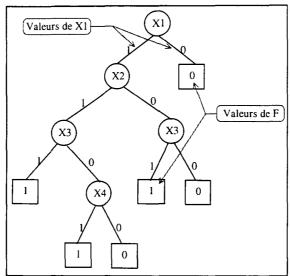


Figure III-4 : Diagramme de décision binaire associé à l'arbre de défaillance Figure III-2

1.2.1.3 Diagramme de fiabilité

Les diagrammes de fiabilité sont la représentation duale des arbres de défaillance. Alors que ces derniers décrivent les conditions qui mènent le système dans un état de panne, les diagrammes de fiabilité présentent les conditions selon lesquelles le système va rester dans l'état de bon fonctionnement.

Le système est représenté par un graphe orienté sans boucle. Les noeuds du graphe correspondent à des composants structurels ou fonctionnels du système. Les éléments dont la défaillance entraîne la panne du système sont mis en série. Si la défaillance de l'ensemble des éléments est nécessaire, ces derniers sont placés en parallèle. Toute combinaison est utilisée. Ainsi, le système sera composé de sous-systèmes mis en série et en parallèle, eux même constitués d'éléments en série et en parallèle.

Les diagrammes de fiabilité et les arbres de défaillance sont équivalents [MAL 95]. La Figure III-5 présente le diagramme de fiabilité équivalent à l'arbre de défaillance de la Figure III-2.

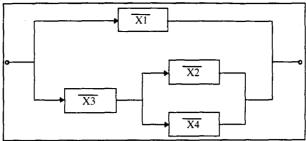


Figure B-5 : Diagramme de fiabilité équivalent à l'arbre de défaillance Figure III-2

1.2.1.4 Modèles état / transition

Alors que les modèles précédents pouvaient être qualifiés de combinatoires, ce type de modèle est basé sur l'énumération complète des états du système. Généralement, le nombre d'états considérés est fini. Les modèles se représentent par des automates à états [HOP 79]. Dans le cas contraire, le lecteur se référera aux machines de Turing [TUR 36], [HAR 65]. Pour les études de disponibilité, les transitions entre les états non défaillants et les états défaillants sont considérées (cf. Figure III-6).

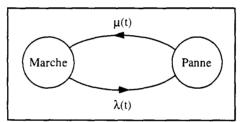


Figure III-6 : Exemple de graphe de Markov

Les analyses qualitatives reposent sur des résultats de la théorie des graphes, comme la recherche de composantes connexes ainsi que les études de chemins.

Des analyses quantitatives sont menées en supposant que le processus de transition entre états est Markovien. Les calculs sont effectués en fonction des taux de panne et des taux de réparation quantifiant la probabilité de franchissement des différentes transitions (cf. Figure III-6). La limitation essentielle de ces modèles est due à la croissance exponentielle du volume des calculs avec le nombre d'éléments. Différentes méthodes étudient la façon de contourner ce problème. La méthode des états de marches critiques permet le calcul d'une approximation du taux de défaillance du système [PAG 80]. Elle ne retient que les états, dits critiques, qui ont au moins une transition vers un état de panne. Une autre méthode nommée méthode itérative résout le modèle markovien de chaque cellule (sous-système) et propage les informations à la cellule suivante [SIM 97]. Elle permet d'exprimer les probabilités d'état du système complet en fonction de celles des éléments qui le composent [SAS 97]. L'étude est intéressante pour des cellules séries ou fortement parallèles.

Enfin, une étude dynamique de la disponibilité opérationnelle a été envisagée. Les Arbres de Défaillances Dynamiques ont été proposés comme extensions des modèles combinatoires



r icédemment présentés [ERE 97]. Ce modèle plutôt état / transition décrit le système par une arborescence de RdP à synchronisations internes. La structure arborescente se fonde sur l'architecture matérielle du système. Chaque RdP modélise l'état d'un composant. Ces états tiennent compte de paramètres caractérisant la maintenance, la durée de vie... Les synchronisations internes verticales et horizontales, associées à un algorithme d'évolution, permettent de répercuter l'évolution d'un RdP sur les autres.

1.2.2 Critères relatifs à la disponibilité

Les méthodes présentées permettent d'aboutir aux valeurs de la disponibilité d'un système en terme de probabilité. Cette donnée est certes intéressante et peut être utilisée pour concevoir un système avec des seuils de sûreté de fonctionnement spécifiés, mais elle peut s'avérer insuffisante pour trouver les éléments à revoir dans la démarche de conception. Mise à part l'AMDEC, les réponses aux questions énoncées au début du § 1.2 ne sont pas immédiates. De plus, l'AMDEC ne quantifie pas la criticité des éléments.

La notion de facteur d'importance a été définie afin d'aider à la conception des systèmes. Elle a été introduite par Birnbaum en 1969 [BIR 69], et reprise par d'autres auteurs. Deux facteurs nous semblent être particulièrement intéressants dans une démarche de conception d'un système sûr de fonctionnement [PAG 80], [SIN 96]:

- facteur d'importance de Birnbaum;
- facteur d'importance critique.

Le facteur d'importance de Birnbaum $B_i(t)$ de l'élément i est la dérivée partielle de l'indisponibilité du système $\overline{A}(t)$ par rapport à l'indisponibilité q_i de l'élément i (cf. formule ci-dessous). On montre que $B_i(t)$ peut s'interpréter comme la probabilité pour que le système se trouve dans un état de marche ayant i comme élément critique sachant que i est en marche. Pour un état de marche donné, l'élément est dit critique si sa défaillance provoque la défaillance du système [PAG 80].

$$B_i(t) = \frac{\partial \overline{A}(t)}{\partial \overline{q}_i} = \frac{\sum_{j \in J_i} P_j(t)}{q_i(t)}$$
 où Ji représente l'ensemble des états de marche critique ayant i pour élément critique et $P_i(t)$ la probabilité de se trouver dans l'état j.

Le facteur d'importance critique $C_i(t)$ est la probabilité pour qu'un élément i soit défaillant sachant que le système est défaillant. Il permet de connaître les éléments à améliorer afin d'avoir une meilleure disponibilité du système. Pour des éléments indépendants, $C_i(t)$ admet pour formule :

$$C_{i}(t) = \frac{\overline{q}_{i}(t)}{\overline{A}(t)} \frac{\partial \overline{A}(t)}{\partial \overline{q}_{i}} = \frac{\overline{q}_{i}(t)}{q_{i}(t)} \frac{P_{j}(t)}{\overline{A}(t)}$$

Les facteurs d'importance sont des fonctions de t. Dans la pratique, ils ne sont calculés que pour une valeur particulière de t ou pour $t = \infty$.

A titre d'exemple, nous donnons Figure III-7 les facteurs d'importance de deux systèmes composés de deux éléments (λ_1, μ_1) , (λ_2, μ_2) en série ou en parallèle. Les valeurs seront relatives à l'élément 1 pour $t = \infty$.

$$\overline{q}_1 = \frac{\lambda_1}{\lambda_1 + \mu_1}$$
; $\overline{q}_2 = \frac{\lambda_2}{\lambda_2 + \mu_2}$; (calculés à partir d'une chaîne de Markov à deux états)

	Configuration série	Configuration parallèle $\overline{q}_1\overline{q}_2$		
Indisponibilité	$\overline{q}_1 + \overline{q}_2 - \overline{q}_1 \overline{q}_2$			
B ₁	$1-\overline{q}_2$	\overline{q}_2		
C_1	$\frac{\overline{q}_1(1-\overline{q}_2)}{\overline{q}_1+\overline{q}_2-\overline{q}_1\overline{q}_2}$	1		

Figure III-7: Exemple de facteurs d'importance

<u>Conclusion</u>: Parmi les modèles présentés, beaucoup s'intéressent à la probabilité de défaillance du système sans analyser la sensibilité de l'architecture. Pour les SFPM, délivrant plusieurs types de fonctions de transformation, la disponibilité ne pourra pas être calculée globalement. Il sera judicieux de la spécialiser par fonction de transformation. Les facteurs d'importance devront ainsi être adaptés. Dans ce contexte, la prochaine section s'intéresse à développer les notions relatives à la tolérance aux pannes des architectures flexibles.

2. La tolérance aux pannes des SFPM

De même que pour les systèmes informatiques [LAP 95], le développement d'un SFPM sûr de fonctionnement passe par l'utilisation combinée de prévention, de prévision, d'élimination de pannes et de tolérance aux pannes. Les méthodes de tolérance aux pannes permettent, en phase de conception, de proposer des architectures qui remplissent leurs fonctions en dépit des pannes. Généralement, les techniques sont fondées sur la redondance d'éléments du SFPM.

Cette section détaille le concept de tolérance aux pannes appliqué aux architectures des SFPM. Pour ces systèmes, la nature et l'organisation des éléments qui les composent sont importantes et variées. Souvent, l'architecture dépasse le stade d'une architecture en ligne.

Parmi les outils développés, beaucoup se sont intéressés à la détermination de paramètres de sûreté de fonctionnement pour une ressource. A notre connaissance, très peu ont considéré l'architecture, ses flexibilités, et l'ont corrélé avec les gammes de fabrication. Nous citons à titre d'exemple le logiciel ALOSURF [SIM 98]. Mais il ne considère principalement que les architectures à dominante série. Le cas d'un système de transport de type convoyeur n'est notamment pas pris en compte.

Les méthodes liées à la disponibilité doivent être adaptées et tenir compte des flexibilités d'architecture (cf. chapitre I §1.2). Ainsi, nous proposons d'élargir les notions de système tolérant, de criticité (vue ici comme une notion duale) au point de vue de la productique. Nous soulignons aussi le lien avec la disponibilité, afin de montrer que ces notions restent bien dans un cadre de sûreté de fonctionnement.

2.1 Définitions

Avant toute chose, nous rappelons que nos hypothèses sur les pannes sont celles énoncées au chapitre II §2.2 et concernent le cas des pannes complètes. De plus nous considérerons que deux pannes ne peuvent apparaître simultanément.

2.1.1 SFPM tolérant / SFPM tolérant vis à vis d'une gamme

<u>Définition 1</u>: La tolérance d'une architecture est son aptitude à conserver un caractère opérationnel malgré la disparition ou l'altération de certains de ses éléments [BER 97/b].

Autrement dit, un SFPM est tolérant s'il continue à délivrer l'ensemble de ses fonctions de transformation (cf. chapitre II §3.3.3.1) malgré la panne d'un de ses éléments.

Cette définition est spécialisée au travers de la définition de la tolérance vis à vis d'une fonction de transformation f_i.

<u>Définition 2</u>: La tolérance d'un SFPM vis à vis d'une fonction de transformation f_i est l'aptitude du SFPM à délivrer f_i , malgré la panne d'un des éléments du système.

Dans notre approche, le SFPM est vu comme une organisation d'éléments. Ces éléments sont les ressources ou bien, à un niveau plus détaillé, les entités correspondant à une fonctionnalité d'une ressource, c'est-à-dire les opérations telles qu'elles ont été définies au chapitre II §3.3.3. Une fonction de transformation est opérationnelle ou délivrable par le SFPM si une pièce, placée en entrée du SFPM, peut être transformée par une ressource exécutant cette fonction et peut ensuite être évacuée du SFPM (cf. Figure III-8).

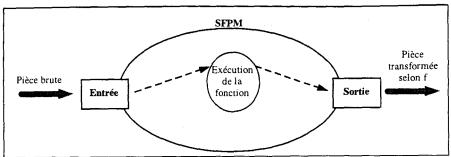


Figure III-8: Vision système de la disponibilité d'une fonction du SFPM

Il va de soit que le SFPM représenté Figure III-9, où M1 et M2 sont des ressources de transformation exécutant les mêmes fonctions, est tolérant. La panne de R11 n'entraîne pas de perte de fonctions de transformation du SFPM, qui peuvent toujours être exécutées par M2.

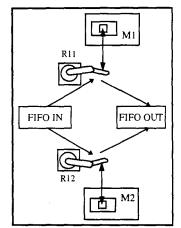


Figure III-9 : Exemple de SFPM tolérant

La définition proposée s'intéresse à la capacité de l'architecture à assurer un service. Elle considère l'ensemble des fonctions de transformation délivrées par le SFPM. Elle est donc indépendante des produits et s'intéresse plutôt à l'architecture du système, du point de vue de son organisation et de ses flexibilités. Elle va donner une idée des potentialités de l'architecture. Cette notion diffère légèrement de la notion de tolérance proposée par Laprie [LAP 95]. Cette dernière inclut à la fois notre définition de la tolérance (au sens étude des potentialités de l'architecture) et les moyens de réalisation que sont les actions de recouvrement. Ceux-ci seront détaillés dans la Partie C, traitant de la reconfiguration du SFPM.

Comme la méthodologie CASPAIM considère à la fois une approche système et une approche produit, nous proposons un troisième type de tolérance : la tolérance vis à vis d'une gamme logique. Ce type de tolérance est une spécialisation de la première définition. Cet éclairage par la facette produit sera surtout exploité pour la criticité.

<u>Définition 3</u>: La tolérance d'un SFPM vis à vis d'une gamme logique est l'aptitude du SFPM à délivrer l'ensemble des fonctions de transformation de la GL, malgré la panne d'un des éléments du système.

Les définitions relatives à la tolérance sont maintenant étendues au travers de la notion de criticité.

2.1.2 La criticité

La criticité est une notion duale de la tolérance. Elle intéresse les éléments du SFPM (ressources ou opérations) et entre dans le cadre d'une étude de la sensibilité des éléments sur la disponibilité du système. Compte tenu de nos hypothèses sur les défaillances, deux cas sont envisagés :

- soit une ressource est considérée en panne et l'ensemble des fonctions qu'elle exécute n'est pas réalisable ;
- soit une opération est considérée non réalisable et seule une des fonctions exécutées par la ressource n'est pas réalisable.

<u>Définition 4</u>: Un élément (opération / ressource) critique est un élément dont la panne rend inutilisable(s) une ou plusieurs fonction(s) de transformation du SFPM [BER 97/c].

Ainsi, un SFPM aura une tolérance maximale s'il ne possède aucun élément critique. Comme pour la tolérance, la prise en compte d'objectifs produits nous amène à définir la criticité vis-à-vis d'une fonction de transformation f_i et la criticité vis à vis d'une GL.

<u>Définition 5</u>: Un élément critique vis à vis d'une fonction de transformation f_i est un élément dont la panne rend inutilisable f_i [BER 98/a]. Il est noté critique/ f_i .

<u>Définition 6</u>: Un élément critique vis à vis d'une GL est un élément dont la panne rend inutilisable(s) une ou plusieurs fonction(s) de transformation d'une GL. Il est noté critique/GL.

Les différents types de criticité énoncés sont liés selon les propriétés suivantes :

- P1 : Si une opération est critique/f_i alors l'opération est critique ;
- P2 : Si une ressource est critique/f_i alors la ressource est critique ;
- P3 : Si une opération est critique/f_i alors la ressource réalisant l'opération est critique/f_i ;
- P4 : Si une opération est critique alors la ressource réalisant l'opération est critique ;
- P5 : Si une opération est critique/f_i alors l'opération est critique vis à vis de toute GL contenant f_i;

• P6: Si une ressource est critique/f_i alors la ressource est critique vis à vis de toute GL contenant f_i;

Ces propriétés découlent directement des définitions. Du point de vue ensembliste, elles se résument par les équations (a), (b), (c) et (d). Dans certains cas, elles peuvent donner lieu à une réciproque. Par exemple, si la ressource est monovalente et ne met en oeuvre qu'une fonction, alors l'ensemble R_k , défini au chapitre II §3.3.3.2, ne contient qu'une seule opération (Op_{Rk-f_l}) , les réciproques de P3, de P4 sont vérifiées.

$$\{Op \ crit/f_i\} \subset \{Op \ crit/GL \ avec \ f_i \in GL\} \subset \{Op \ crit\}$$
 (a)

$$\{\text{Res crit/}f_i\} \subset \{\text{Res crit/}GL \text{ avec } f_i \in GL\} \subset \{\text{Res crit}\}\$$
 (b)

$$\{\text{Res } R_k \text{ telle que } \exists \text{ Op}_{Rk-f_i} \text{ crit/} f_i\} \subset \{\text{Res crit/} f_i\}$$
 (c)

$$\{\text{Res } R_k \text{ telle que } \exists \text{ Op}_{Rk\text{-fi}} \text{ crit}\} \subset \{\text{Res crit}\}\$$
 (d)

2.2 Tolérance et disponibilité

L'implication de la tolérance dans la sûreté de fonctionnement a été montrée. Compte tenu des définitions énoncées, une architecture sera d'autant plus tolérante que certains de ses éléments sont redondants. Ces redondances apparaissent au niveau des flexibilités de l'architecture. La tolérance s'intéresse donc à ces flexibilités, qui seront considérées comme des potentialités.

S'appliquant au cas des SFPM, qui sont des SED (cf. chapitre I §1.1), la tolérance va regarder à un instant donné si, compte tenu de la panne d'un élément, on peut toujours solliciter les fonctions de transformation pour lesquelles le système a été conçu. Etudiant plutôt la pertinence des redondances passives directes ou induites, elle s'intéresse moins à la continuité de service dans un but de fiabilité. La conservation du caractère opérationnel passe par une ou plusieurs commutations entre éléments et un changement du cheminement des produits au sein de l'architecture. Pour une pièce, la continuité de service n'est pas forcément assurée par les flexibilités. A titre d'exemple, la rupture d'un outil peut entraîner une panne avec dégradation de la pièce en usinage. Bien qu'il existe d'autre postes opératoires mettant en oeuvre la même fonction de transformation, la pièce doit être mise au rebus.

En fait, la disponibilité est sous-jascente à la tolérance. Si l'on se réfère à la caractéristique principale de la disponibilité (l'aptitude à être opérationnel lors de la sollicitation), la définition initiale concernant la tolérance peut se transposer comme suit : Un SFPM tolérant conserve la disponibilité de ses fonctions de transformation malgré la défaillance d'un de

CHAPITRE III : Définition de la tolérance dans le cadre de la sûreté de fonctionnement

ses éléments. Le lien apparaît alors clairement. Il résulte que la tolérance contribue à l'étude de la disponibilité opérationnelle des systèmes complexes au regard de leurs flexibilités.

La criticité, introduite à l'issue de la tolérance, s'attache aux éléments sensibles. Comme pour les facteurs d'importance (cf. §1.2.2 de ce chapitre), son étude a pour finalité de déterminer directement les éléments à prendre en compte pour améliorer la disponibilité du SFPM. Nous verrons par la suite comment quantifier la criticité de chaque élément, ce qui nous affranchira du calcul des facteurs d'importance.

Disponibilité et tolérance diffèrent dans les méthodes servant à leur évaluation. La tolérance analyse l'impact de la défaillance d'un élément sur le SFPM en terme de service. Le point de vue consiste à considérer les fonctions de transformation restantes après occurrence d'une défaillance. Le principe d'évaluation sera donc de partir d'un modèle de fonctionnement normal du système, rendant compte des services délivrés, et de le restreindre lorsqu'une défaillance affecte le SFPM. La majorité des études de disponibilité se fondent plutôt sur un modèle intégrant le fonctionnement défaillant, reliant événements indésirables et événements indésirés. Les modèles considèrent explicitement la perte d'un service plutôt que les services restants.

Conclusion: Ce chapitre nous a permis d'introduire la notion de tolérance aux pannes appliquée aux architectures des SFPM. Partant du concept général relatif à la sûreté de fonctionnement, la tolérance a été précisée au travers de différentes définitions. Nous avons choisi de ne considérer que l'approche passive intervenant en conception. Nous rappelons que l'approche active sera détaillée en partie C. Les extensions ont concerné la prise en compte ou non d'un type de production ainsi que la définition de la criticité d'un élément. Cette dernière permet de s'intéresser directement aux éléments sensibles de l'architecture. Nous avons aussi montré comment tolérance et disponibilité sont liées. L'étude de la tolérance passe par une phase d'analyse de conséquences des pannes. En fait, la tolérance aux pannes va aussi s'intéresser à la prévision de panne. Cette analyse nécessite l'utilisation d'un modèle, dont la présentation fait l'objet du prochain chapitre.

Chapitre IV:

Détermination du modèle de représentation de la Partie Opérative pour l'étude de la tolérance

Il résulte de la présentation des études sur la disponibilité opérationnelle qu'un outil de modélisation et d'analyse est une condition sine qua non afin de mettre en évidence des paramètres liés au futur fonctionnement des SFPM, tant du point de vue de la sûreté que des performances. Les considérations, associées à notre approche de la tolérance, ont souligné qu'une analyse de conséquences d'une panne sur l'architecture est une étape importante pour l'étude de la tolérance. Dans cette finalité, nous proposons un modèle de la Partie Opérative.

Etant donné que la tolérance est vue comme une étape préliminaire au bon déroulement d'une réaction après occurrence d'une défaillance, dont le centre de décision est le recouvrement (chapitre II §2), le modèle caractérisant l'architecture a des besoins similaires, du point de vue représentation du côté fonctionnel et organisationnel de l'architecture. Ce modèle reprend donc les contraintes énoncées au chapitre II §3.2. De ce fait, les entités définies, appelées opérations, conviennent. Nous allons les utiliser afin de construire le modèle.

Ce chapitre présente le modèle appelé Graphe d'Accessibilité Opérationnel (GAO). Il s'agit d'un modèle entités / associations dont les entités sont les opérations et dont une association privilégiée est la relation d'accessibilité. La disponibilité d'un élément de transformation est

ainsi interprétée au niveau du GAO et permet de prendre en compte la coopération des opérations de transfert, de transformation... Ce modèle est basé sur un outil graphe orienté, ce qui facilite son exploitation. Une démarche progressive permet de construire le modèle à partir d'une architecture existante ou spécifiée. Elle passe par quatre étapes (description en terme d'opérations, regroupement des opérations, association des opérations aux noeuds, et liaison des noeuds entre eux). Les concepts théoriques qui gravitent autour du regroupement des opérations sont détaillés. La démarche complète est illustrée autour d'un exemple. Enfin, le modèle est complété par la définition des caractéristiques, propres à l'évaluation de la tolérance d'une architecture.

1. Présentation du Graphe d'Accessibilité Opérationnelle

L'idée de base consiste à élaborer un modèle à partir duquel il est possible d'analyser les conséquences d'une défaillance sur les services (fonctions de transformation) du SFPM.

Notre préoccupation est d'établir une modélisation de l'architecture de production mettant en avant les différentes flexibilités inhérentes à cette dernière. Nous nous intéressons notamment à bien traduire les flexibilités de routage (issues par exemple d'un convoyeur circulaire), celles des ressources de transformation polyvalentes ainsi que celles induites par l'organisation des ressources.

Le modèle est fondé sur le principe du modèle entité association. Le SFPM est décrit en terme d'entités (les opérations) et les associations vont traduire les liens entre opérations afin d'accomplir le service demandé. Ainsi, la disparition de certaines entités, induite par une panne, pourra aisément se répercuter. Les opérations ayant été présentées au chapitre II, cette section s'intéresse surtout à préciser les relations qui sont utilisées afin d'aboutir au modèle.

1.1 Les entités du modèle

Les entités du modèle sont constituées de l'ensemble des fonctions mises en oeuvre par les éléments physiques du procédé. Ce sont les opérations décrites au chapitre II §3.3.3. Les propriétés de ces entités en sont les caractéristiques.

Par rapport au concept d'opération, nous introduisons la notion d'opération élémentaire :

<u>Définition</u>: Une opération élémentaire est une opération réalisée en une seule fois, de façon continue, c'est-à-dire sans qu'il soit possible d'intervenir pour choisir une autre alternative au cours de l'exécution normale de l'opération.

En d'autres termes, lorsque l'ordre de réalisation d'une opération élémentaire est lancé, on doit attendre la fin de l'opération pour pouvoir intervenir sur le produit. Une analogie peut être établie avec le domaine informatique : Une opération élémentaire est équivalente à une instruction indivisible au niveau d'un processeur.

Les types d'opérations, établis au chapitre II §3.3.3.3, permettent d'établir des opérations d'usinage élémentaires, de transfert élémentaires, ...

D'après le niveau de granularité fixé au chapitre II §3.2, les procédés d'usinage, d'assemblage, ne sont pas détaillés. Ainsi les éléments se situent à un niveau plus abstrait que celui de l'actionneur. Ils doivent cependant traduire avec précision les fonctions identifiées au chapitre II §3.3.3.1. La notion d'opération élémentaire nous permet de complètement préciser le niveau de granularité du modèle, et donne une condition d'arrêt au processus de décomposition utilisé dans la démarche d'obtention du modèle. Cette décomposition est illustrée dans la section suivante relative à l'obtention du modèle.

1.2 Les relations d'accessibilité

Nous cherchons à lier les entités entre elles, afin de répondre à la finalité d'évaluation de la tolérance.

1.2.1 Choix d'un type de relation

Plusieurs liens de dépendance entre opérations sont possibles (liens fonctionnels, organiques, structurels, temporels, informationnels, ...). Le choix d'un type est arrêté en fonction des objectifs du modèle. En effet, nous ne nous orientons pas vers un modèle universel, qui aboutirait à un modèle difficilement lisible, par la variété des liens existant entre les entités. La Figure IV-1 montre comment, pour deux types de relations, il est préférable de construire deux modèles distincts en choisissant de faire apparaître la relation prépondérante. La connexion entre ces modèles sera aisée puisqu'ils sont composés des mêmes entités reposant sur un système d'information.

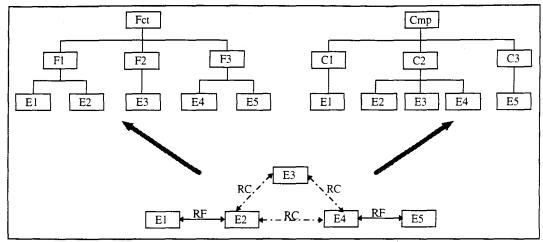


Figure IV-1: Représentation de plusieurs relations utilisant plusieurs schémas

Le principe retenu pour lier les opérations part du constat que l'activité de production résulte de l'interaction entre les fonctions de transformation et le produit. Afin que cette activité soit opérationnelle, il faut que la fonction de transformation soit exécutée sur le produit, c'est-à-dire qu'il puisse atteindre une opération de transformation mettant en oeuvre cette fonction. Ainsi les liens considérés pour associer les opérations afin d'obtenir le modèle sont les relations d'accessibilité entre opérations.

Remarque: D'autres associations seront considérées pour transcrire certaines caractéristiques attachées aux opérations. Cette démarche sera préférée à la définition d'un attribut multivalué, constitué de différents champs de longueur variable. Par exemple, si l'on veut traduire le fait qu'une opération ne peut recevoir que des pièces de type $\{f_1,f_2\}$, $\{f_1,f_3\}$, et $\{f_1,f_2,f_3\}$, il sera préférable de le transcrire selon la Figure IV-2.

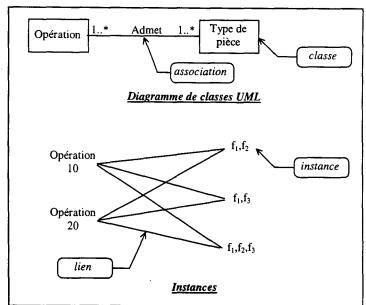


Figure IV-2: Transcription d'une propriété par une relation (en langage UML)

Dans la suite nous nous intéressons à définir la relation principale utilisée pour les analyses de tolérance, c'est-à-dire la relation d'accessibilité.

1.2.2 Définition de l'accessibilité

La relation d'accessibilité a été introduite par Amar [AMA 94] pour les resœurces. Elle traduit les liens existants entre différentes ressources de production concernant les échanges de pièces. Nous dirons qu'un moyen est en accessibilité directe avec un autre si un produit quelconque peut transiter de l'un à l'autre sans passer par un moyen physique intermédiaire. L'accessibilité indirecte se déduit par transitivité.

Cette relation est déclinée au niveau des opérations par la définition qui suit. Elle va de plus traduire l'existence possible d'un flux orienté de pièces entre deux opérations. D'après la Figure IV-3, il faut que l'opération 2 ait été sollicitée, puis réalisée pour qu'une pièce, placée au niveau de l'opération 1, puisse solliciter l'opération 3 ou l'opération 4. C'est aussi une relation de précédence.

<u>**Définition**</u>: Une opération Op_{Ri-fj} est en accessibilité directe avec une autre opération Op_{Rk-fl} si un produit quelconque peut directement être traité par Op_{Ri-fj} après avoir été traité par Op_{Rk-fl} .

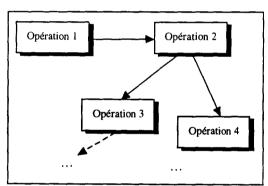


Figure IV-3: La relation d'accessibilité

1.2.3 Implication sur la disponibilité d'une opération

Nous allons donner des interprétations de la relation d'accessibilité et analyser le lien avec la disponibilité.

Vue comme un lien causal, la relation d'accessibilité traduit la coopération d'opérations permettant l'activité de production. Elle montre les différentes opérations qui doivent être exécutées sur un produit afin que le produit sollicite une opération précise.

Ainsi, apparaissent deux types d'indisponibilité pour une opération : l'indisponibilité directe et l'indisponibilité induite. L'indisponibilité directe est le fait que la ressource réalisant l'opération est en panne. L'opération ne mettra pas en oeuvre sa fonction lorsqu'elle sera sollicitée. L'indisponibilité induite résulte du fait que l'opération n'est pas accessible depuis l'entrée, sans pour autant que la fonction mise en oeuvre par cette opération ne soit altérée. A cela nous ajoutons le fait que la sortie n'est pas accessible depuis l'opération concernée. En

effet, dans le contexte de la production automatisée, le SFPM est considéré selon une vision système et aucune pièce ne sera mise en entrée du SFPM, si elle ne peut être évacuée par la suite (cf. Figure IV-4). Ceci permet d'établir la définition de la disponibilité d'une opération.

<u>Définition</u>: Une opération est disponible si et seulement si elle n'est pas hors service, et si elle peut recevoir un produit placé à l'entrée du SFPM et que ce dernier peut ensuite être évacué vers la sortie.

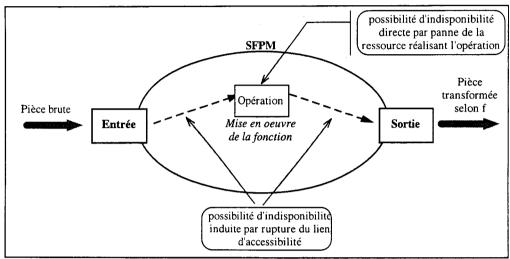


Figure IV-4: Indisponibilité d'une opération du SFPM

La disponibilité est déclinée au niveau d'une fonction de transformation du SFPM, en considérant qu'une fonction est un ensemble d'opérations. Ceci nous amène à la définition de la disponibilité d'une fonction.

<u>Définition</u>: Une fonction f_i est disponible si et seulement si il existe au moins une opération disponible mettant en oeuvre f_i .

1.3 Choix d'un outil support

Ayant établi les entités et la relation principale entre ces entités, nous précisons l'outil sur lequel s'appuie le modèle. Cet outil a pour objectif de faciliter la représentation du modèle et d'être une base pour la mise en oeuvre des traitements permettant une évaluation de la tolérance.

Une représentation graphique est un atout. Elle assure la lisibilité et facilite la compréhension du modèle. L'utilisation des symboles fournit une notation claire et non ambiguë.

Plusieurs outils graphiques permettant de traduire ces relations s'offrent à nous. Notre choix s'est fixé sur le **graphe orienté** pour sa simplicité et parce qu'il suffit à traiter les problèmes d'analyse d'accessibilité. Cet outil permet une traduction aisée des accessibilités

entre les opérations. Son intérêt a l'ailleurs été montré sur d'autres modèles permettant d'aider au raisonnement pour la supervision [LEY 94]. Il nous permet également de bénéficier des études relatives à la théorie des graphes et de traiter les questions d'accessibilité après défaillance comme une recherche d'existence de chemin.

Le GAO est donc un graphe dont les noeuds sont composés d'opérations et dont les arcs représentent les relations d'accessibilité entre opérations. Mathématiquement, le GAO se définit par deux ensembles : Σ_N et Σ_A . Σ_N représente un ensemble de parties de l'ensemble des opérations Σ_{op} , et Σ_A est un ensemble d'arcs. La Figure IV-5 montre le GAO associé à une architecture de production Figure III-9. Rappelons que la dynamique propre au modèle ne nous intéresse pas pour l'instant. Comme nous le verrons dans la partie C, la mise à jour est réalisée par la commande qui possède son propre modèle RdP.

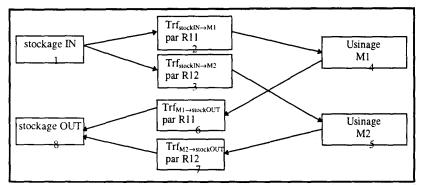


Figure IV-5 : Exemple de GAO correspondant au SFPM représenté Figure III-9

Remarque: L'outil RdP aurait pu être utilisé. Le modèle obtenu peut d'ailleurs très bien être transposé en utilisant les RdP (cf. Figure IV-6). En effet, un graphe orienté se transforme assez aisément en RdP graphe d'état. Mais, dans un RdP, les problèmes d'accessibilité ne sont pas moins complexes. Une solution serait de regarder si la transition juste en amont du noeud est vivante à partir du marquage initial constitué d'un jeton à la place d'entrée. Ce type d'étude nécessite soit d'établir le graphe de marquage, soit d'analyser les matrices d'incidence du réseau, ce qui revient à une étude de graphe par matrice d'accessibilité. De plus, les exploitations des RdP, autre que pour des propriétés dans le cas de RdP simples, s'appuient en grande partie sur la simulation, ce qui n'est pas l'objet des travaux présentés. Nous pensons que l'utilisation du modèle RdP pour le GAO se justifiera lorsqu'une approche par simulation sera envisagée.

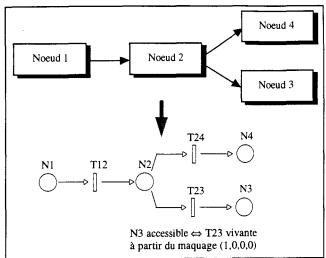


Figure IV-6: Passage du GAO au RdP - Analogie entre accessibilité et vivacité

1.4 Considérations associées au modèle

Nous avons présenté le GAO comme un graphe dont les noeuds sont composés d'opérations et les arcs orientés traduisent l'existence d'un flux potentiel de pièces entre les opérations. Nous allons présenter quelques caractéristiques structurelles du modèle. Nous verrons que ce modèle satisfait nos besoins, fixés au chapitre II §3.2.1 et à l'issue des considérations sur la tolérance (chapitre III).

1.4.1 Propriétés structurelles du GAO

Le GAO est un graphe orienté pouvant posséder des boucles. Les noeuds d'entrée et de sortie sont dissociés par construction. Cette hypothèse facilitera les calculs qui seront effectués ultérieurement.

Le GAO ne possède pas d'arcs bidirectionnels. Cette propriété traduit la non-réversibilité des traitements mis en oeuvre par les opérations d'un noeud. Dans certains cas, le retour vers un noeud précédent pourra se faire, mais obligera d'utiliser d'autres noeuds (cas d'un circuit).

Les autres propriétés sont issues de la nature des noeuds. Un noeud sera composé d'une ou de plusieurs opérations de type transfert ou de type stationnaire. Nous verrons que ceci nous permet de définir des noeuds de type transfert, composés d'opérations de transfert, des noeuds de type transformation, etc... Les propriétés suivantes s'intéressent plus généralement aux noeuds de type transfert et aux noeuds de type stationnaire.

Nous notons l'alternance entre noeuds de type transfert et noeuds de type stationnaire. Ainsi, deux noeuds de transfert, de stockage, d'usinage ne peuvent être directement liés par un arc orienté traduisant une relation d'accessibilité.

Seuls les noeuds stationnaires peuvent avoir plusieurs noeuds en amont (jonction) ou plusieurs noeuds en aval (disjonction). Par contraposée, un noeud de transfert n'aura qu'un seul noeud stationnaire en amont et qu'un seul noeud stationnaire en aval.

Ces propriétés énoncées sont fondamentales. Elles sont utilisées dans un but de vérification de bonne construction du graphe, ainsi que dans une procédure automatique d'obtention du graphe à partir de la connaissance de l'ensemble des opérations.

1.4.2 Intérêt du modèle

Le modèle étant maintenant présenté, nous pouvons vérifier qu'il répond bien aux objectifs fixés. Construit à partir des opérations, le modèle comporte les bonnes propriétés au niveau informationnel (cf. chapitre II §3.2). D'après la nature des opérations et de part les caractéristiques susceptibles de leur être associées, les qualités d'ouverture sont assurées. Elles permettent d'éviter l'écueil d'avoir un modèle trop axé sur un type de données.

L'apport de la relation d'accessibilité permet d'avoir une **représentation des flexibilités** de l'architecture sans restrictions imposées par la commande. Le GAO montre l'ensemble des opérations du SFPM, ainsi que la façon dont elles peuvent être amenées à coopérer. Il ne représente pas explicitement les états défaillants, ainsi la combinatoire des états n'est pas trop importante.

Les flexibilités, présentées au chapitre I §1.2, sont finement représentées, ce qui lève toutes ambiguïté. En effet, l'accessibilité est représentée de façon plus précise que dans le modèle d'Amar [AMA 94]. Pour preuve, nous considérons la Figure IV-7. Dans sa partie gauche, il n'est pas possible de savoir si une pièce peut directement transiter de M1 vers M2. Plusieurs GAO sont susceptibles d'être associés à ce schéma. Si les transferts sont prévus (c'est-à-dire si les programmes de commande du robot ont été conçus), le GAO contenant 10 noeuds représentera la PO de ce système.

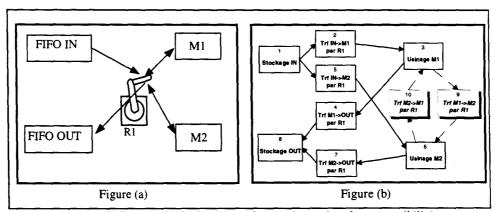


Figure IV-7: Intérêt du GAO pour la représentation des accessibilités

La prise en compte de la relation d'accessibilité, associée à l'outil graphe orienté, implique que le GAO est facilement **modifiable**. Compte tenu de nos hypothèses sur les défaillances, la traduction de la panne d'une ou de plusieurs opérations pourra être facilement réalisée par suppression des opérations considérées. L'impact se traduira sur le modèle en terme d'accessibilité grâce au support de la théorie des graphes apporté par l'outil.

Nous constatons que la structure du GAO permet de traduire la mise en série et en parallèle d'éléments (les opérations). A ce titre, le GAO peut être vu comme une extension du diagramme de fiabilité comportant des sous-diagrammes de fiabilité ayant des éléments en commun. Le modèle permet, sur une même représentation, de prendre en compte chacunes des fonctions de transformation délivrées par le SFPM. Pour cette raison, il comporte des boucles.

Remarque: Des similitudes peuvent apparaître entre le GAO et l'arborescence COD proposée par Kermad [KER 96]. Pour une GL, celle-ci va représenter, au niveau de ses feuilles terminales, un ensemble de transferts et d'opérations de transformation. Si le niveau bas est mis à plat, et si les entités redondantes sont éliminées, un modèle s'approchant d'une partie du GAO peut être obtenu. Ce modèle, rappelons le, ne concerne qu'une seule GL et est moins précis quant aux flexibilités supportées par les ressources complexes de transport de type convoyeur. La différence majeure du modèle arborescent COD est qu'une partie de la commande est intégrée au modèle et sert à restreindre ce modèle de façon à pouvoir expliciter l'ensemble des transferts utilisables dans un cas particulier de production.

Le GAO couvre l'ensemble des services offerts par le SFPM. Toutes les potentialités (transferts, mises en oeuvre des fonctions de transformation, ...) sont représentées. Mais elles ne sont pas explicitement dénombrées. Ainsi les transferts d'un point précis à un autre devront être calculés. L'avantage est qu'un seul modèle sert de base à la réflexion, quelles que soient les GL lancées.

Le GAO peut donc être construit hors-ligne une fois pour toutes, et être exploité de différentes façons. Comme nous le verrons par la suite, ce modèle, orienté procédé, peut aussi bien être utilisé pour l'évaluation de la tolérance de l'architecture que servir de base à l'activité de supervision consistant à réagir face à une panne (voir partie C).

2. Démarche d'obtention du modèle

Cette section va présenter la démarche permettant, à partir des spécifications d'un SFPM, d'aboutir à la représentation GAO du système. Cette démarche, rigoureuse, garantit l'unicité du modèle obtenu ainsi que sa validité. La méthode est séquentielle afin d'être facilement validée. Elle prend pour point de départ une architecture donnée existante ou en cours de conception.

Après une présentation générale de la démarche, l'obtention des noeuds du GAO à partir des opérations est détaillée. Puis, un exemple illustre l'ensemble des points abordés.

2.1 Présentation de la démarche

La démarche d'élaboration du modèle [BER 97/d] passe par quatre étapes (cf. Figure IV-8). La première étape consiste à déterminer les opérations élémentaires. Elle est qualifiée de démarche descendante. La notion d'opération élémentaire est un critère d'arrêt dans la décomposition de la partie opérative en opérations. L'association des opérations aux noeuds passe par deux étapes. Des opérations agrégées sont, tout d'abord, définies à partir des opérations élémentaires. Cette étape de composition, basée sur des règles précises, fait partie d'une démarche ascendante. Son intérêt est d'obtenir une complexité moindre du graphe. A chacune de ces opérations agrégées est ensuite associé un noeud. Puis, un noeud est associé à chaque opération élémentaire restante. Ce dernier cas correspond à la situation où le noeud n'est constitué que d'une seule opération. Enfin, le graphe est construit relativement aux relations d'accessibilité.

Les items suivants décrivent complètement les différentes étapes de la démarche [BER 98/d].

I. <u>Identification des opérations élémentaires</u>

- A. Identifier les fonctions d'usinages à réaliser ;
- B. Identifier le ou les lieux de réalisation ;

 Ceci revient à identifier les ensembles d'opérations d'usinages élémentaires.
- C. En fonction de la structure des ressources, identifier les lieux de stockage, leur associer une opération de stockage. Si, lorsque le stockage actif ne reçoit aucun ordre de stockage de la partie commande, la zone de stockage actif laisse passer les pièces, alors associer à cette zone une opération de libre passage;

Les ensembles d'opérations de stockage (passif, actif) et de libre passage élémentaires sont identifiés.

- D. Identifier les fonctions de transferts entre chaque lieu de stockage à partir des relations d'accessibilité ;
- E. Identifier les ressources réalisant les transferts;
 Les ensembles d'opérations de transferts élémentaires sont identifiés.

II. Regroupement des opérations élémentaires

- A. Regrouper les opérations stationnaires élémentaires réalisées sur un même lieu ;
- B. Regrouper les opérations de transfert élémentaires équivalentes ; Une partition de l'ensemble de toutes les opérations est obtenue.
- III. Associer un noeud à chaque sous ensemble d'opérations ;

Les noeuds du GAO sont identifiés.

IV. Construction du graphe

Connecter chaque noeud en respectant l'accessibilité entre opérations ;

La structure du graphe est déterminée.

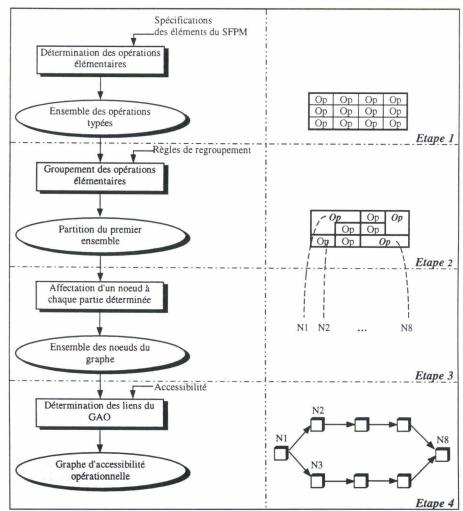


Figure IV-8: Démarche d'obtention du GAO

La méthode est illustrée au §2.3 de ce chapitre.

2.2 Obtention des constituants du modèle

2.2.1 Les opérations élémentaires (étape 1)

Les opérations élémentaires ont été présentées aux chapitres II et III. Parmi les types définis, nous considérerons principalement les opérations stationnaires et les opérations de transfert. Le caractère élémentaire va donner le niveau de granularité pour la décomposition. Ceci sera particulièrement illustré pour la décomposition des transferts du convoyeur dans l'exemple Figure III-1.

2.2.2 Les opérations agrégées (étape 2)

L'agrégation permet d'obtenir des types d'opérations non élémentaires. Ces opérations seront qualifiées d'opérations agrégées. La finalité est d'obtenir les opérations qui vont constituer un noeud, ce qui aboutit à un graphe moins complexe.

<u>Définition</u>: Une opération agrégée est une opération constituée de plusieurs opérations élémentaires. La relation liant les opérations élémentaires est typée et traduit soit un "ou exclusif" soit un "et".

A un instant donné, une opération agrégée constituée d'opérations en "ou" mettra en oeuvre l'une des opérations élémentaires qui la composent. Si, pour réaliser l'une quelconque des opérations qui composent l'opération agrégée, il faut obligatoirement réaliser une opération Op_{Ri-fi} , alors Op_{Ri-fi} est en "et" avec les autres opérations.

Les regroupements sont régis par deux règles fondées sur la taxonomie des opérations présentée au chapitre II §3.3.3.3. La première règle concerne les opérations élémentaires de type stationnaire et est guidée par la notion de lieu de mise en oeuvre. La seconde règle concerne les opérations élémentaires de type transfert. Elle repose sur la notion de fonction spécialisée.

<u>Règle 1</u>: Les opérations stationnaires élémentaires mettant en oeuvre une fonction sur le même lieu sont agrégées pour constituer une opération stationnaire agrégée.

<u>Règle 2</u>: Les opérations élémentaires de type transfert mettant en oeuvre une fonction de transfert fonctionnellement équivalent sont agrégées pour constituer une opération agrégée de type transfert.

Deux fonctions de transfert seront considérées équivalentes si elles délivrent, pour des types de pièces équivalents (diamètre de saisie et poids ne nécessitant pas de changement de préhenseur), un transfert entre le même lieu d'origine et le même lieu de destination.

Différentes opérations agrégées d'usinage, d'assemblage, de stockage, de contrôle, de liaison et de transfert sont ainsi obtenues. Nous allons détailler les opérations suivantes :

- Opération d'usinage agrégée;
- Opération de liaison;
- Opération de transfert agrégée ;

2.2.2.1 Opération d'usinage agrégée

Cette opération agrégée est obtenue par regroupement d'opérations d'usinage élémentaires selon la règle 1. Toutes ces opérations sont donc réalisées par la même ressource d'usinage. Ces opérations sont en relation typée en "ou" (cf. Figure IV-9). Ce type d'opération agrégée, illustre le cas d'une ressource d'usinage polyvalente, pouvant exécuter plusieurs fonctions.

Une telle opération peut aussi contenir une opération de stockage actif élémentaire réalisée sur le même lieu que les opérations d'usinage. On considère dans ce cas que la machine d'usinage peut exécuter un stockage actif de la pièce et qu'elle pourra être utilisée comme tel dans certains cas de défaillance. L'opération de stockage élémentaire est liée par une relation typée en "et" (cf. Figure IV-9). Elle est en effet nécessaire à l'exécution de n'importe quelle fonction d'usinage.

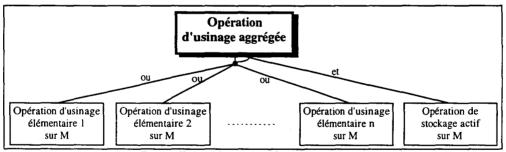


Figure IV-9: Opération d'usinage agrégée

2.2.2.2 Opération de liaison

L'opération de liaison est obtenue par regroupement, selon la règle 1, de deux opérations élémentaires stationnaires fonctionnellement antagonistes : une opération de stockage actif élémentaire et une opération de libre passage élémentaire. La relation, liant ces opérations, est typée en "ou" (cf. Figure IV-10).

Physiquement, l'opération de liaison illustre le comportement d'une butée d'un convoyeur à bande permettant d'arrêter (position sortie) ou de laisser passer (position rentrée) une palette. Elle est réalisée par des éléments actifs (du point de vue de la commande) d'une ressource de transfert complexe.

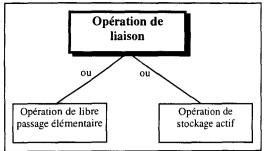


Figure IV-10: Opération de liaison

2.2.2.3 Opération de transfert agrégée

L'opération de transfert agrégée est obtenue par le regroupement, selon la règle 2, d'opérations élémentaires de transfert. La relation, liant ces opérations élémentaires, est typée en "ou" (cf. Figure IV-11). Ce type d'opération agrégée, illustre le cas où plusieurs ressources exécutent la même fonction de transfert sur le même type de pièces.

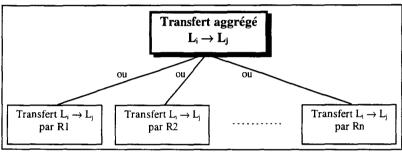


Figure IV-11: Opération de transfert agrégée

2.2.3 Les noeuds (étape 3)

Un noeud est constitué d'une opération élémentaire ou d'une opération agrégée. Ils forment des entités du GAO et permettent de lier les opérations par des relations d'accessibilité.

L'obtention des noeuds est réalisée selon le schéma Figure IV-12. Les opérations composées sont listées. A chacune de ces opérations, est associé un noeud. A chaque opération élémentaire restante (opérations élémentaires qui n'ont pas été regroupées), est ensuite associé un noeud. En fait, l'ensemble des opérations est partitionné suivant l'application des règles 1 et 2. Les opérations non agrégées forment des parties réduites à un singleton. Chaque noeud représente donc une partie de Σ_{op} .

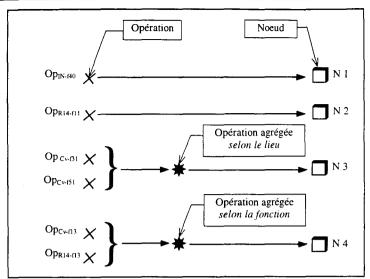


Figure IV-12: Association des opérations aux noeuds

Remarque: Nous soulignons qu'un noeud de transfert, mettant en oeuvre la fonction f_{ti} , s'identifie avec l'ensemble F_{ti} , introduit au chapitre Π §3.3.3.2. Le noeud de transformation, réalisé par la ressource R_k , va quant à lui s'identifier avec l'ensemble \mathfrak{R}_k . Il y a en effet identité, pour une ressource de transformation, entre le lieu de réalisation et la ressource. Les fonctions de classification Cl_f , et Cl_R peuvent donc être utilisées dans cette étape d'obtention des noeuds (cf. Figure IV-13).

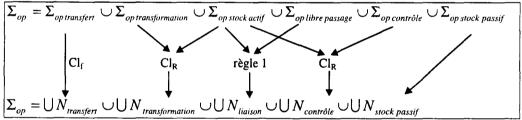


Figure IV-13: Passage des opérations aux noeuds

La caractéristique "**Opérations potentielles**" est attachée à chaque noeud. Elle prend comme valeur l'ensemble des opérations élémentaires qui composent le noeud ainsi que la relation "et / ou" liant chaque opération au noeud.

Ainsi sont définis des noeuds de transfert, de stockage, d'usinage, d'assemblage, de contrôle, de liaison. Les noeuds sont ensuite liés entre eux par des relations d'accessibilité typées décrites précédemment afin de constituer le GAO.

2.3 Illustration de la démarche

Les items décrivant la démarche sont maintenant illustrés au travers de l'exemple de la cellule d'usinage Figure IV-14. Cette cellule est composée de trois ressources d'usinage M1, M2 et M3. Elles exécutent respectivement les fonctions d'usinage : M1 (f₁, f₃), M2 (f₁, f₃), M3 (f₂, f₃). R14 est un robot réalisant les opérations de transfert de FIFO IN vers Z1, de Z1

vers FIFO OUT, de Z1 vers Z2, de Z2 vers Z1, de Z1 vers Z4 et de Z4 vers Z1. R11 est un robot de chargement dédié à M1. R12 est dédié à M2 et R13 à M3. CV est un convoyeur avec aiguillages. Il autorise les transferts de Z1 vers Z2 ou Z5, de Z2 ou Z5 vers Z3, de Z3 vers Z4 ou Z6, de Z4 ou Z6 vers Z1.

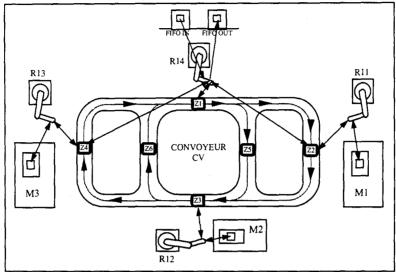


Figure IV-14 : Exemple de cellule

Par convention, nous notons de la façon suivante les fonctions réalisées par le SFPM :

- f₁ à f₃ pour les fonctions de transformation (usinage);
- f₁₁ à f₂₈ pour les fonctions de transfert (f₁₁: transfert de FIFO IN vers Z1; f₁₂: transfert de Z1 vers Z2; f₁₃: transfert de Z2 vers Z1; ...; f₂₈: transfert de Z1 vers FIFO OUT;
- f₃₁ à f₄₁ pour les fonctions de stockage; f₃₁ : stockage en Z1; ...; f₄₁ : stockage FIFO OUT;
- f_{51} à f_{56} pour les fonctions de libre passage; f_{51} : libre passage en Z_1 ; ...; f_{56} : libre passage en Z_6 .

Identification des opérations élémentaires

A partir des données sur les fonctions et les lieux d'usinages, nous obtenons 6 opérations d'usinage élémentaires :

• $Op_{M1-f1}, Op_{M1-f3}, Op_{M2-f1}, Op_{M2-f3}, Op_{M3-f2}, Op_{M3-f3};$

Les fonctions de stockages suivantes sont identifiées :

• stockage Z1 (f₃₁), stockage Z2 (f₃₂), stockage Z3 (f₃₃), stockage Z4 (f₃₄), stockage Z5 (f₃₅), stockage Z6 (f₃₆), stockage M1 (f₃₇), stockage M2 (f₃₈), stockage M3 (f₃₉);

• stockage FIFO IN (f₄₀), stockage FIFO OUT (f₄₁);

Ceci nous amène à déterminer les opérations de stockage suivantes :

- Stockage actif: Op_{Cv-f31}, Op_{Cv-f32}, Op_{Cv-f33}, Op_{Cv-f34}, Op_{Cv-f35}, Op_{Cv-f36}, Op_{M1-f37}, Op_{M2-f38}, Op_{M3-f39};
- Stockage passif : Op_{IN-f40}, Op_{OUT-f41} ;

Les opérations Op_{Cv-f31} à Op_{Cv-f36} sont associées à des opérations de libre passage :

• Op_{Cv-f51}, Op_{Cv-f52}, Op_{Cv-f53}, Op_{Cv-f54}, Op_{Cv-f55}, Op_{Cv-f56};

Conformément aux relations d'accessibilité, les fonctions de transfert sont :

- transfert de FIFO IN vers Z1 (f_{11}) , transfert de Z1 vers FIFO OUT (f_{12}) ;
- transfert de Z1 vers Z2 (f₁₃), transfert de Z1 vers Z5 (f₁₄), transfert de Z2 vers Z3 (f₁₅), transfert de Z5 vers Z3 (f₁₆), transfert de Z3 vers Z4 (f₁₇), transfert de Z3 vers Z6 (f₁₈), transfert de Z4 vers Z1 (f₁₉), transfert de Z6 vers Z1 (f₂₀), transfert de Z2 vers Z1 (f₂₁), transfert de Z1 vers Z4 (f₂₂);
- transfert de Z2 vers M1 (f₂₃), transfert de M1 vers Z2 (f₂₄);
- transfert de Z3 vers M2 (f₂₅), transfert de M2 vers Z3 (f₂₆);
- transfert de Z4 vers M3 (f₂₇), transfert de Z4 vers M3 (f₂₈);

20 opérations de transfert sont ainsi déterminées :

- Op_{R14-f11}, Op_{R14-f12}, Op_{R14-f13}, Op_{R14-f19}, Op_{R14-f21}, Op_{R14-f22};
- Op_{Cv-f13}, Op_{Cv-f14}, Op_{Cv-f15}, Op_{Cv-f16}, Op_{Cv-f17}, Op_{Cv-f18}, Op_{Cv-f19}, Op_{Cv-f20};
- Op_{R11-f23}, Op_{R11-f24};
- Op_{R12-f25}, Op_{R12-f26};
- Op_{R13-f27}, Op_{R13-f28};

Regroupement des opérations élémentaires

Les opérations de liaison sont obtenues en groupant successivement Op_{Cv-f51} avec Op_{Cv-f31} , etc...

3 opérations d'usinage agrégées sont obtenues en groupant :

Op_{M1-f1}, Op_{M1-f3} et Op_{M1-f37};

- Op_{M2-f1} , Op_{M2-f3} et Op_{M2-f38} ;
- Op_{M3-f2}, Op_{M3-f3} et Op_{M3-f39}.

2 opérations de transfert agrégées sont obtenues en groupant :

- Op_{R14-f13} avec Op_{Cv-f13};
- Op_{R14-f19} avec Op_{Cv-f19}.

Construction du graphe

Le tableau Figure IV-15 résume la correspondance entre noeuds et opérations qui les composent.

NI	N2	N3	N4	N5	N6	N7	N8	N9	N10
Op _{IN-f40}	Op _{R14-f11}	Op _{Cv-f51} Op _{Cv-f51}	Op _{R14-f13} Op _{Cv-f13}	Op _{Cv-f52} Op _{Cv-f52}	Op _{R11-f23}	Ор _{М1-f1} Ор _{М1-f3} Ор _{М1-f37}	Op _{R11-f24}	Op _{Cv-f14}	Op _{Cv-(35} Op _{Cv-(55}
NII	N12	N13	N14	N15	N16	N17	N18	N19	N20
Op _{Cv-f15}	Op _{Cv-f16}	Op _{Cv-f33} Op _{Cv-f53}	Op _{R12-r25}	Op _{M2-f1} Op _{M2-f3} Op _{M2-f38}	Op _{R12-r26}	Op _{Cv-f17}	Op _{Cv-f34} Op _{Cv-f54}	Op _{R13-f27}	Ор _{м3-г2} Ор _{м3-г3} Ор _{м3-39}
N21	N22	N23	N24	N25	N26	N27	N28	N29	
Op _{R13-f28}	Op _{CV-f18}	Op _{Cv-f36} Op _{Cv-f56}	Op _{Cv-f20}	Op _{R14-f19} Op _{Cv-f19}	Op _{R14-f21}	Op _{R14-f22}	Op _{R14-f12}	Op _{0UT-f41}	

Figure IV-15: Correspondance entre noeuds et opérations

Le GAO est représenté Figure IV-16. De façon à améliorer la lisibilité de la Figure, les conventions suivantes ont été utilisées :

- Lorsqu'un noeud n'est constitué que d'une seule opération, la légende complète de l'opération apparaît ;
- Pour les autres noeuds, la légende partielle est notée. Entre parenthèses sont aussi notées les différentes fonctions de transformation mises en oeuvre par les opérations pour un noeud de transformation, ou les différentes ressources réalisant les opérations pour un noeud de transfert;
- Les noeuds stationnaires sont en gris.

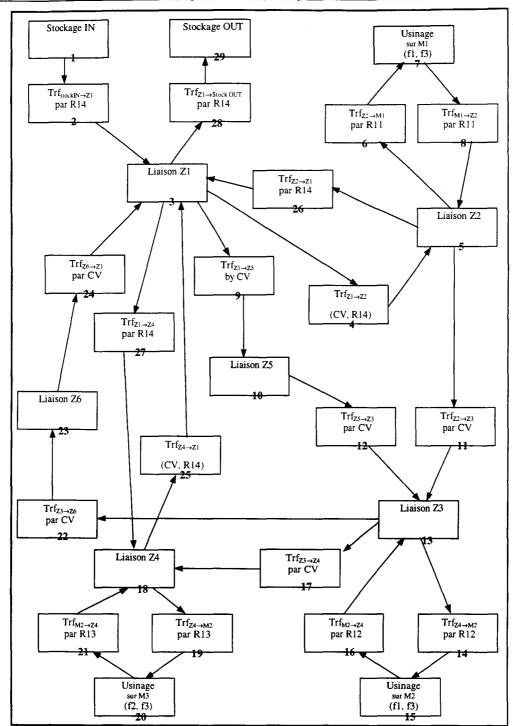


Figure IV-16: GAO correspondant à l'exemple Figure IV-14

3. Caractéristiques utilisées pour la tolérance

Le GAO présenté modélise bien l'architecture du point de vue de ses flexibilités. Afin de le rendre plus pertinent pour l'étude de la tolérance, nous spécialisons le GAO en vue d'appliquer des traitements permettant de déterminer les éléments critiques de l'architecture.

Dans cette section, nous introduisons des caractéristiques supplémentaires, qui servent à déterminer la criticité d'une architecture. Certaines caractéristiques sont attachées aux opérations, comme celles définies au chapitre II §3.3.4. D'autres sont directement définies au

CHAPITRE IV : Détermination du modèle de représentation de la PO pour l'étude de la tolérance

niveau de chaque noeud. Elles sont ensuite répercutées sur les opérations qui constituent le noeud.

3.1 Caractéristiques propres aux entités

Nous présentons dans un premier temps les caractéristiques qui sont directement attachées aux entités (noeuds ou opérations) du GAO. Elles ne se déduisent pas d'autres caractéristiques.

3.1.1 Caractéristiques associées aux noeuds

La caractéristique "opérations potentielles" a été brièvement introduite au paragraphe 2.2.3 de ce chapitre, relatif à la description des noeuds. Elle est statique et traduit l'ensemble des opérations élémentaires qui composent le noeud. Pour un noeud d'usinage, cet ensemble correspond à celui des opérations d'usinage et de l'opération de stockage actif, réalisées par la ressource d'usinage. Les opérations sont implantées avec une configuration (outil + programme pièce) donnée. Elle reçoit comme valeur la liste des opérations que la machine peut réaliser du fait des outils et des programmes de commande qui lui sont fournis.

De façon à transcrire la structure du graphe, les caractéristiques "noeuds en amont" et "noeuds en aval" donnent respectivement l'ensemble des noeuds directement liés en amont (noeuds pères) et l'ensemble des noeuds directement liés en aval (noeuds fils) au noeud considéré.

Les caractéristiques qui suivent (Accessible, Bloquant) se fondent sur l'agencement des opérations dans le GAO et de leurs propriétés en terme d'accessibilité. Pour cette raison, elles sont d'abord définies au niveau des noeuds du GAO, puis reportées sur les opérations, qu'elles intéressent en premier lieu. Elles font référence aux propriétés fondamentales d'existence d'un chemin entre deux points a et b, dans un graphe orienté. Cette propriété, également appelée accessibilité de b à partir de a, est un problème classique de la théorie des graphes [AHO 89], [GON 95]. Compte tenu de nos considérations sur la disponibilité d'une fonction de transformation au niveau du SFPM (cf. Figure IV-4), nous la spécialisons en deux types [BER 97/b]:

- Accessibilité depuis l'entrée ;
- Blocage vers la sortie.

Noeud "Accessible depuis l'Entrée" (Acc.E.): Cette caractéristique indique s'il existe un chemin permettant d'atteindre le noeud à partir du noeud stockage d'entrée. Une pièce, placée à l'entrée du SFPM, pourra donc atteindre les opérations qui constituent un noeud Acc.E.

Noeud "Bloquant vers la sortie" (Blq.S.): Lorsque cette caractéristique est vérifiée, il n'est pas possible, à partir d'un noeud bloquant, d'atteindre le noeud de stockage de sortie. Le blocage revient pour un noeud à la perte de l'ensemble de ses connexions vers la sortie. Cette caractéristique indique si une pièce, placée au niveau du noeud, pourra être évacuée du SFPM.

3.1.2 Caractéristiques associées aux opérations

La caractéristique "état", permet de noter quelle opération est considérée comme défaillante, dans notre démarche de recherche d'éléments critiques. Compte tenu de nos hypothèses sur les défaillances, cette caractéristique est binaire : elle prend pour valeur {normal} (l'opération est réalisable) ou {hors-service} (l'opération n'est pas réalisable). Elle sera détaillée au chapitre VII §2.1.1.1.

La caractéristique "significatif" s'utilise dans la recherche des opérations critiques. Elle permet de déterminer les entités qui, en cas de panne, pourraient avoir un impact concernant la disparition d'une fonction de transformation. Nous dirons d'une opération qu'elle est significative si sa disparition entraîne la non-accessibilité depuis l'entrée ou le blocage vers la sortie d'un ou de plusieurs noeuds de transformation. Par convention, une opération de transformation sera toujours significative.

Si, après analyse, une opération est jugée critique, cette information est notée au travers de la caractéristique "critique". Celle-ci permet de noter vis à vis de quelles fonctions de transformation, cette opération est critique. Une dernière caractéristique, "degré de criticité", prend pour valeur le degré de criticité de l'opération.

<u>Définition</u>: Le degré de criticité d'une opération Op_{Ri-fj} est le nombre de fonctions de transformation que le SFPM n'est plus en mesure de délivrer, lorsque Op_{Ri-fj} est en panne [BER 97/c]. Il est noté $d_{Op_{Ri-fj}}$.

Le degré de criticité permet de quantifier explicitement la criticité d'une opération. Défini pour chaque opération critique, il peut être étendu à toutes les opérations en considérant que lorsqu'une opération n'est pas critique, son degré est égal à 0. Ces valeurs sont renseignées par les algorithmes de détermination des opérations critiques présentés au chapitre V.

3.2 Relation entre caractéristiques propres et caractéristiques induites

Les liens permettant de déduire les caractéristiques d'un noeud (resp. d'une opération à partir de celles de l'entité duale, opération (resp. noeud), sont soulignés. Ils sont fondés sur la sémantique des noeuds. Nous donnons aussi une interprétation des caractéristiques du point de vue du SFPM.

3.2.1 Caractéristiques induites par les opérations sur les noeuds

Concernant l'étude de la tolérance, la principale caractéristique des opérations se retrouvant au niveau des noeuds est la caractéristique **état du noeud**. Celle-ci prend deux valeurs : {normal} et {hors-service}. Elle permet de savoir si un noeud doit être considéré comme faisant partie ou non du graphe.

Cette caractéristique est renseignée comme suit : Les opérations du noeud, répertoriées grâce à la caractéristique "opérations potentielles", associée au noeud, sont listées. Deux cas sont à envisager :

- 1. Le noeud possède une opération en "et". Si cette opération a pour "état" {horsservice}, le noeud est l'état {hors-service}. Sinon l'état du noeud est à {normal};
- 2. Le noeud n'est constitué que d'opérations en "ou". Si toutes ces opérations ont pour "état" {hors-service}, le noeud est à l'état {hors-service}. Dans le cas contraire, le noeud est à l'état normal. Nous verrons, au chapitre VII, une notion supplémentaire traduisant le fait qu'une partie des opérations en "ou" du noeud ne sont pas dans l'état normal.

Du point de vue ensembliste, un noeud est vu comme une partie de l'ensemble des opérations. La démarche consiste à enlever de l'ensemble les opérations dont l'état est noté {hors-service}. Si l'ensemble est vide alors l'état du noeud passe à l'état hors-service. Pour le cas d'une opération en "et", il suffit de considérer que dès que cette opération est à l'état {hors-service}, toutes les opérations du noeud sont mises à l'état {hors-service}.

3.2.2 Caractéristiques induites par les noeuds sur les opérations

Les caractéristiques Acc.E., Blq.S., définies au niveau des noeuds intéressent directement les opérations qu'ils contiennent. Elles sont répercutées au niveau des opérations selon les règles suivantes :

- Règle 3: Les opérations, contenues dans un noeud Acc.E., sont Acc.E.;
- Règle 4: Les opérations, appartenant à un noeud non-Acc.E., sont non-Acc.E.;

- Règle 5: Les opérations, contenues dans un noeud Blq.S., sont Blq.S.;
- Règle 6: Les opérations, appartenant à un noeud non-Blq.S., sont non-Blq.S.

<u>Remarque</u>: Une opération hors-service, donc Blq.S., n'entraîne pas forcément que le noeud le soit. Il y a équivalence pour un noeud constitué d'une seule opération et pour une opération en "et".

Il résulte des définitions et règles précédentes qu'une opération Acc.E. pourra être sollicitée par une pièce, placée à l'entrée du SFPM, qui demandera sa réalisation. Pour une opération, l'accessibilité depuis l'entrée est donc une condition nécessaire à la réalisation de l'opération.

La caractéristique de blocage vers la sortie est introduite pour traduire une conséquence possible de la sollicitation d'une opération sur le SFPM. Pour une opération, le non-blocage vers la sortie est la condition que la demande de réalisation de l'opération n'entraînera pas l'impossibilité de récupérer la pièce en sortie du SFPM. Le fait de considérer que les opérations défaillantes sont retirées du graphe, nous permet de donner une autre interprétation. Si une opération Op_{Ri-fj} est Blq.S., alors Op_{Ri-fj} ou les opérations qui suivent amènent irrémédiablement la pièce, sur laquelle a été réalisée Op_{Ri-fj} , à solliciter une opération défaillante Op_{Rd-fk} . Pour éviter qu'une pièce ne sollicite une ressource défaillante R_d , il faut ainsi éviter de l'amener à emprunter une séquence d'opérations qui conduise à des opérations réalisées par R_d . Donc, le non-blocage vers la sortie va assurer que la sollicitation de l'opération ne va pas obliger une pièce à demander une opération défaillante.

Conclusion: Le modèle de représentation de la PO, appelé GAO, a été présenté. Il s'agit d'un modèle dérivé du modèle entités / associations, s'appuyant sur le concept de relation d'accessibilité. L'outil utilisé, pour représenter cette relation privilégiée, est le graphe orienté. Nous avons montré comment ce modèle satisfait à une partie de nos exigences. Concernant l'évaluation de la tolérance, des caractéristiques supplémentaires ont été définies. Elles sont en grande partie fondées sur la notion d'accessibilité dans un graphe orienté et sur l'interprétation du GAO en tant qu'ensemble d'opérations. Leur mise à jour va faire l'objet de traitements spécifiques qui sont présentés dans le chapitre suivant.

Chapitre V:

Evaluation

de la tolérance d'une architecture

Les deux principaux outils d'aide à la conception sont la simulation et les méthodes analytiques.

La simulation permet une description précise du système et une analyse de la dynamique (transitoires, ...). Ses inconvénients émanent de la complexité de mise en oeuvre et de la charge de calcul élevée, lorsque le modèle de description interne est assez fin. La simulation demande des données nombreuses et variées en entrée de façon à couvrir un ensemble raisonnable de cas [DON 97]. Les méthodes analytiques permettent de modéliser un atelier de façon simplifiée. Elles sont plus faciles à mettre en oeuvre et nécessitent une charge de calcul plus faible. Une détermination analytique est ciblée et l'éventail des conclusions est moins large que pour une simulation.

Concernant les résultats, une simulation permet plutôt de conclure à propos de régimes transitoires. La détermination analytique conclut à propos de régimes permanents établis. Mathématiquement, une détermination analytique peut apporter une preuve alors qu'une simulation ne prouve rien quant aux propriétés d'un système.

Dans la suite, nous privilégions l'approche analytique car nous ne cherchons pas à identifier les régimes transitoires. De plus, nous ne nous intéressons pas à l'aspect temporel pour caractériser l'évolution du SFPM. Le modèle n'est pas pour autant fermé à la simulation.

Nous présentons maintenant les traitements qui, associés au GAO, nous permettent de déterminer des mesures de la tolérance d'une architecture. La démarche générale consiste, dans un premier temps, à déterminer les entités critiques. Une méthode inductive d'analyse d'impact d'une panne est utilisée à ce propos. Par l'utilisation du GAO, la conséquence de la défaillance de l'entité est vue en terme d'accessibilité sur les opérations. Nous nous ramenons à un problème de recherche d'existence d'un chemin, qui reste un problème assez classique de théorie des graphes [GON 95]. Des critères, calculés à partir des données établies lors de la phase précédente, permettent ensuite d'évaluer globalement l'architecture. Cette évaluation peut servir à valider l'architecture en fonction de seuils prédéterminés. Elle peut aussi permettre de comparer l'architecture avec d'autres architectures types.

Après un positionnement de la démarche d'évaluation de la tolérance dans une démarche plus générale de conception, la méthode permettant de déterminer les opérations et les ressources critiques est détaillée. A partir de la connaissance de ces éléments, des critères évaluant la tolérance de l'architecture sont proposés. La prise en compte de données probabilistes dans les expressions de certains critères est aussi abordée. L'intérêt des critères est souligné par des exemples applicatifs. Nous montrons comment ils permettent d'établir des règles de conception d'architectures tolérantes aux pannes et de classer les architectures par types. L'analyse des architectures du point de vue de leur tolérance, de leur flexibilité, de leur productivité nous amène à considérer que la conception d'une architecture passe par une analyse multicritères.

1. Principe et positionnement de la démarche

1.1 Principe de la démarche d'évaluation de la tolérance

Alors que les études quantitatives de disponibilité se sont plutôt intéressées en premier lieu à la disponibilité du système pour ensuite en évaluer les éléments sensible, la démarche proposée s'inscrit dans un principe inverse. La Figure V-1 illustre ce principe.

Nous déterminons dans un premier temps les entités sensibles, à savoir les entités critiques. La connaissance directe des éléments critiques est extrèmement intéressante puisqu'elle donne les points à améliorer afin d'obtenir une meilleure tolérance. A ce sujet, le GAO est utilisé dans une analyse de conséquence de la disparition d'une ou de plusieurs opérations sur la disponibilité des fonctions de transformation délivrées par le SFPM. Puis, des critères, basés sur la connaissance des degrés de criticité des éléments, permettent d'évaluer globalement la tolérance de l'architecture. Ils sont normés afin de favoriser la comparaison des architectures entre elles.

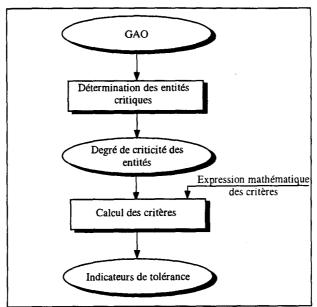


Figure V-1 : Démarche générale d'évaluation de la tolérance d'une architecture

1.2 Positionnement dans une démarche de conception

La détermination du GAO nécessite que l'architecture soit déjà spécifiée. L'évaluation de la tolérance de l'architecture est donc réalisée sur une architecture existante ou spécifiée. Mais la procédure d'évaluation peut être intégrée dans une démarche de conception générale, constituée d'étapes élémentaires caractérisées par des boucles de type spécification, conception, validation. L'évaluation de la tolérance sert de validation et intervient dans une boucle de feed-back. Elle peut, par exemple, amener à reconsidérer l'utilisation d'une ressource, comme l'ajout d'un transfert réalisé par un robot, de façon à obtenir une architecture plus tolérante. De même, des impératifs de tolérance pourront aboutir à demander l'introduction de redondances pertinentes au niveau de l'architecture. Ce n'est pas réalisé lors d'une première étape de conception où seule la validation des fonctionnalités de l'architecture est réalisée.

La Figure V-2 présente l'intégration de la l'évaluation de la tolérance dans une démarche générale de conception, prenant en compte des aspects relatifs à la sûreté de fonctionnement.

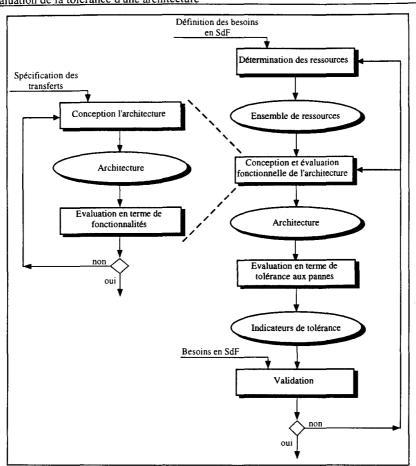


Figure V-2: Intégration de l'évaluation de la tolérance dans une démarche de conception

Des études heuristiques, appliquées à différents types d'architecture, pourront amener à déterminer des règles de conception. Elles aboutiront à d'avantage intégrer la tolérance dans la conception.

Comme présenté par la suite, l'évaluation proposée donne des mesures concernant la tolérance relativement à une panne (panne d'une fonctionnalité d'une ressource ou panne de la totalité des fonctionnalités d'une ressource) de l'architecture. Une utilisation récursive de la méthode peut être envisagée. Un premier niveau de tolérance (tolérance à une panne) est évalué. Puis l'architecture amputée d'une entité (opération ou ressource) est considérée et le processus est réitéré. Un deuxième niveau de tolérance (tolérance à deux pannes), dépendant de l'entité enlevée, est ainsi calculé et ainsi de suite (cf. Figure V-3). Il est évident qu'une telle évaluation récursive est très combinatoire, ce qui en limite l'intérêt. Une solution pourrait être de ne considérer, pour le calcul de la tolérance de niveau n+1, que l'architecture de niveau n amputée de l'entité qui a le plus de risque d'être en panne. Cette démarche reviendrait à ne considérer qu'une branche de l'arbre présenté Figure V-3.

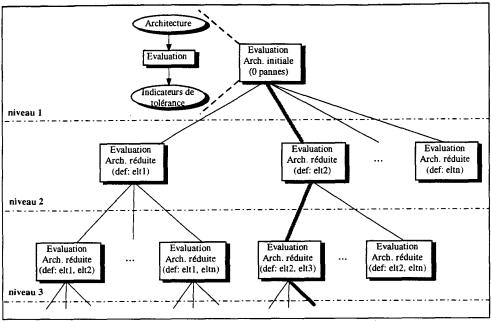


Figure V-3: Evaluation récursive de la tolérance d'une architecture

2. Détermination des opérations et ressources critiques

Cette section présente la démarche permettant de déterminer les entités critiques. Elle s'attache ensuite à détailler deux algorithmes de détermination du degré de criticité des opérations et ressources.

2.1 Présentation de la méthode

La méthode pour déterminer si une entité est critique va consister à supposer que cette entité est en panne et à en analyser les conséquences en terme de perte de fonctionnalités du SFPM (Figure V-4). A ce titre, la méthode peut être qualifiée de méthode inductive et s'intègre dans les méthodes de prévision de pannes. Elle se distingue de l'injection de faute [LAP 95], qui va simuler l'évolution de la faute, et des tests d'influence de panne, qui nécessitent de modéliser la panne [GEN 96]. Le GAO n'est pas utilisé comme modèle de comportement anormal.

Compte tenu de notre approche producticienne, l'aspect étudié est la disponibilité des fonctions de transformation du système. Par hypothèse, la panne complète d'une entité revient à considérer le SFPM privé de cette entité. La finalité consiste à savoir si cette architecture réduite (amputée de l'entité) possède encore des fonctions de transformation disponibles. Le degré de criticité (cf. chapitre III §2.1.2) représente le nombre de fonctions perdues par le SFPM quand l'entité est en panne.

L'analyse est fondée sur le modèle de l'architecture précédemment présenté à savoir le GAO. Puisqu'une fonction est vue comme un ensemble d'opérations qui la mettent en oeuvre (chapitre II §3.3.3.2), la démarche revient à rechercher les opérations encore disponibles dans une architecture où l'entité étudiée a été retirée. Notre approche de la disponibilité d'une opération (cf. chapitre III §2.1.1) implique qu'une opération est disponible si elle est en état normal et si elle est Acc.E. et non-Blq.S.

Ainsi, l'analyse des conséquences, fondée sur l'utilisation du GAO, se ramène essentiellement à un problème d'accessibilité. Le problème se réduit à une recherche d'existence de chemin dans un graphe. Nous pouvons appliquer des algorithmes de type recherche en largeur, recherche en profondeur, ou de détermination de la fermeture transitive [AHO 89], [LIG 90], [GON 95].

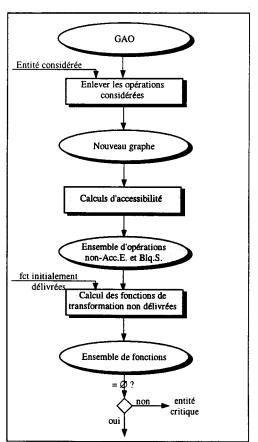


Figure V-4 : Démarche d'obtention des entités critiques

La démarche se décompose en trois étapes principales (cf. Figure V-4) :

- 1. Analyser et représenter, au niveau du GAO la disparition de l'entité considérée, en terme de disparition d'opération, puis de noeuds ;
- 2. Calculer les accessibilités des opérations ;
- 3. Lister les opérations disponibles et en déduire les fonctions encore disponibles.

Remarque: L'étape 1 peut aussi revenir à construire un GAO de l'architecture amputée de l'entité considérée. Compte tenu de l'approche considérée, nous préférons partir du GAO représentant l'architecture initiale et en retirer certains éléments. La démarche d'obtention du GAO, présentée au chapitre IV, n'est donc utilisée qu'une fois.

Nous détaillons maintenant la démarche permettant d'aboutir à l'ensemble des opérations et ressources critiques ainsi qu'à leur degré de criticité.

2.2 Recherche des opérations critiques

Une approche séquentielle permet d'identifier les opérations critiques. Elle est appliquée à toutes les opérations élémentaires du GAO. Elle considère la structure du graphe, la nature des opérations puis les fonctions de transformation délivrées. Comme présenté, le principe consiste à successivement considérer le GAO privé d'une opération et à déterminer si l'ensemble des opérations de transformation encore à l'état normal, Acc.E. et non-Blq.S. met en oeuvre la totalité des fonctions de transformation initialement délivrées par le SFPM. Etant donné le nombre important d'opérations, l'étape 3 est décomposée en deux sous-étapes : nous déterminons d'abord si l'opération est significative et, en cas de réponse positive, les fonctions de transformation non délivrées sont explicitées. L'ensemble des procédures est résumé par un algorithme présenté en annexes.

2.2.1 Détermination des opérations significatives

Nous rappelons qu'une opération est significative si c'est une opération de transformation ou si sa défaillance rend non-Acc.E. et Blq.S. des noeuds de transformation. La méthode va dépendre du type de l'opération considérée. Nous traitons à part le cas des opérations de transformation, de stockage passif, et de contrôle. L'opération de transformation, par définition, est toujours significative. L'opération de stockage passif n'est, quant à elle, jamais significative, étant donné qu'elle ne peut être défaillante.

2.2.1.1 Cas d'une opération de transfert

Nous déterminons si le noeud de transfert comportant l'opération doit être retiré du GAO. Compte tenu des règles de regroupement, le noeud de transfert n'est influencé par la disparition de l'opération de transfert que s'il n'est constitué que de l'opération considérée. Dans le cas d'un noeud composé d'au moins deux opérations de transfert, il existe au moins une autre opération équivalente, à l'état normal, qui met en oeuvre la même fonction. Le noeud garde sa fonctionnalité.

Si le noeud de transfert comportant l'opération a été retiré du graphe, les calculs d'accessibilité déterminent les nouveaux noeuds non-Acc.E. et Blq.S. Si cet ensemble comporte des noeuds de transformation alors l'opération est significative.

Exemple: Considérons le GAO Figure IV-16. La disparition de Op_{R14-f13} n'implique pas la disparition du noeud N4, constitué aussi de Op_{Cv-f13}. Op_{R14-f13} n'est donc pas significative. En revanche, La disparition de Op_{R13-f27} entraîne la disparition de N19. Elle entraîne de plus la non-Acc.E. de N20. Op_{R13-f27} est donc significative.

2.2.1.2 Cas d'une opération de stockage actif

Deux éventualités sont examinées :

- L'opération de stockage appartient à un noeud de transformation. Elle n'est pas prise en considération. Pour la détermination des opérations critiques, nous considérons la perte d'une seule fonctionnalité d'une ressource, c'est-à-dire la perte d'une seule opération réalisée par la ressource. Dans le cas d'un noeud de transformation, l'opération de stockage actif est en relation de "et" avec les autres opérations. Sa disparition entraîne donc la mise hors-service de toutes les opérations de transformation réalisées par la ressource. Puisque ce cas sera traité lors de la détermination des ressources critiques, nous considérons que l'opération de stockage actif ne peut être supposée défaillante pour la recherche des opérations critiques.
- L'opération de stockage appartient à un noeud de liaison. Sa disparition induit la non-accessibilité vers les opérations directement connectées, n'appartenant pas au même "support de réalisation". Tout se passe comme si le noeud de liaison était réduit à un noeud de libre passage. L'ensemble des opérations de transferts qui nécessitaient l'opération de stockage pour leur réalisation (c'est-à-dire les opérations de transferts réalisées par des ressources autres que la ressource réalisant le stockage) disparaissent.

Comme précédemment, les calculs d'accessibilité à partir de la structure du nouveau GAO déterminent un ensemble de noeuds non-Acc.E. et Blq.S. Si cet ensemble comporte des noeuds de transformation alors l'opération de stockage actif est significative.

A titre d'exemple, considérons le GAO Figure IV-16. La disparition de Op_{Cv-f33} implique que Op_{R12-f25} et Op_{R12-f26} sont retirées du GAO. Puisque les noeuds correspondants N14 et N16 ne comportent qu'une seule opération, ils sont eux aussi retirés du graphe. Les calculs d'accessibilité déterminent que N15 n'est pas Acc.E. Op_{cv-f33} est donc significative.

2.2.1.3 Cas d'e se opération de libre passage

La procéd pour une opération de libre passage d'un noeud de liaison est symétrique à celle présentée pour l'opération de stockage actif appartenant à ce même noeud de liaison. Tout se passe ici comme si le noeud de liaison était réduit à un noeud de stockage actif. L'ensemble des opérations de transferts directement connectées, appartenant au même "support de réalisation" que l'opération de libre passage, disparaissent. Les calculs d'accessibilité sont menés à partir d'un modèle ne comportant pas ces opérations.

A titre d'exemple, considérons le GAO Figure IV-16. La disparition de Op_{Cv-f53} implique que Op_{R12-f17} et Op_{R12-f18} sont retirées du GAO. Puisque les noeuds correspondants N17 et N22 ne comportent qu'une seule opération, ils sont eux aussi retirés du graphe. Les calculs d'accessibilité déterminent que N15 est Blq.S. Op_{cv-f53} est donc significative.

2.2.2 Détermination des opérations critiques

Cette étape va déterminer si une opération précédemment identifiée comme significative est critique. Elle calcule aussi son degré. Deux cas sont à considérer :

- 1. L'opération Op_{Ri-fj} est une opération de transformation. Puisque sa disparition n'implique aucun changement du point de vue de la structure du graphe (l'opération de stockage actif est en effet maintenue pour cette étude), l'objet consiste à déterminer si l'ensemble F_j d'opérations mettant en oeuvre f_j est réduit au singleton {Op_{Ri-fj}}. Si tel est le cas, Op_{Ri-fj} est critique par rapport à f_j. Son degré de criticité est égal à 1.
- 2. Pour les opérations significatives d'un autre type, les opérations de transformation devenues non-Acc.E. et Blq.S. sont retirées des ensembles F₁ à F_n d'opérations mettant en oeuvre les fonctions de transformation initialement délivrées par le SFPM. Si un des ensembles F_j devient vide, alors l'opération considérée est critique par rapport à f_j. Son degré de criticité est égal au nombre d'ensembles devenus vides.

Exemple: Si l'on se réfère au GAO Figure IV-16, les opérations critiques sont Op_{R14-f11}, Op_{R13-f27}, Op_{R13-f28}, Op_{R14-f12}, Op_{Cv-f34} et Op_{M3-f2}. L'opération significative Op_{R11-f24} n'est pas critique car la fonction de transformation f₁ (resp. f₃) mise en oeuvre par Op_{M1-f1} (resp. Op_{M1-f3}), peut aussi être mise en oeuvre par Op_{M2-f1} (resp. Op_{M2-f3}), toujours Acc.E. et non-Blq.S. Les degrés de criticité des opérations citées sont :

$$\begin{split} d_{Op_{R14-f11}} &= d_{Op_{R14-f12}} = 3 \; ; \\ \\ d_{Op_{R13-f27}} &= d_{Op_{R13-f28}} = d_{Op_{Cv-f34}} = d_{Op_{M3-f2}} = 1 \; . \end{split}$$

2.3 Recherche des ressources critiques

La recherche des ressources critiques est adaptée de la méthode précédente. Le principe consiste à successivement considérer le GAO privé d'une ressource et à déterminer si l'ensemble des opérations de transformation, encore à l'état normal, Acc.E. et non-Blq.S., met en oeuvre la totalité des fonctions de transformation initialement délivrées par le SFPM. Cette fois, ce n'est plus une opération qui est supposée disparaître, mais toutes les opérations réalisées par la ressource considérée. Ces opérations sont repérées grâce à leur caractéristique "support de réalisation".

Etant donné qu'il y a nettement moins de ressources que d'opérations, nous n'avons pas développé la notion de ressource significative. Nous définissons et calculons le degré de criticité d'une ressource par analogie avec le degré de criticité d'une opération.

<u>Définition</u>: Le degré de criticité d'une ressource R_i est le nombre de fonctions de transformation qui ne sont plus délivrées par le SFPM quand R_i disparaît [BER 97/c]. Il est noté d_{R_i} .

Propriété:
$$\forall R_i \ (\forall f_j \ / \exists Op_{R_i - f_i}) \quad d_{Op_{R_i - f_i}} \le d_{R_i}$$
.

Exemple: L'algorithme de détermination des ressources critique et de leur degré de criticité est présenté en annexes. Il est appliqué au GAO Figure IV-16. Les ressources critiques trouvées sont R13, R14, CV, et M3. R11, M1, R12, et M2 ne sont pas critiques car elles sont redondantes. Les degrés de criticité des ressources citées sont:

$$d_{R14} = d_{Cv} = 3;$$

$$d_{R13} = d_{M3} = 1$$
.

3. Proposition de critères de tolérance

La section précédente a permis l'identification des éléments sensibles d'une architecture. Cette phase permet de répondre à une partie des questions sur la disponibilité énoncées au chapitre III §1.2. Nous définissons maintenant des critères basés sur la connaissance des éléments critiques et de leur degré de criticité respectifs. L'objectif est de comparer différentes architectures entre elles. Pour cette raison, les critères prennent leur valeur dans [0, 1]. Plus leur valeur numérique est faible, meilleure est la tolérance de l'architecture.

La définition de la tolérance (cf. chapitre III §2.1) est volontairement large afin de permettre différentes caractérisations. Elle autorise la définition de plusieurs types de critères. Ainsi nous présentons des critères de tolérance dans l'absolu, s'intéressant à l'architecture en

CHAPITRE V : Evaluation de la tolérance d'une architecture

tant que système délivrant des fonctions de transformation. D'autres types de critères considèrent une production donnée.

Pour chaque type de critères, deux critères sont proposés. Le premier est relatif aux opérations. Le second se rapporte aux ressources. Cette dualité est conservée de façon à rendre compte de la notion de dégradation fonctionnelle (cas des critères sur opérations) et de panne complète (cas des critères sur ressources) d'une ressource. Les critères relatifs aux opérations vont traduire l'impact de la perte d'une seule fonctionnalité d'une ressource sur le SFPM, mais pas de la perte complète de la ressource. Les critères relatifs aux ressources rendent compte de l'impact de la perte complète de la ressource sur le SFPM. Chaque famille a son intérêt. L'utilisation des critères relatifs aux ressources permet au concepteur de conclure sur le choix des ressources ainsi que leur agencement de façon à obtenir un SFPM tolérant. En se fondant sur les critères relatifs aux opérations, il statue sur la pertinence de la mise en oeuvre de telle ou telle fonctionnalité de la ressource (tout particulièrement pour les ressources de transfert).

3.1 Critères de tolérance dans l'absolu [BER 97/c]

Ces critères évaluent la capacité du SFPM à délivrer un service.

3.1.1 Evaluation de la flexibilité organisationnelle

Les critères qui suivent se fondent sur la connaissance des éléments critiques.

3.1.1.1 Indice de criticité absolu par opérations

Cet indice exprime le nombre d'opérations critiques (noté Nb_{crit}^{Op}), rapporté au nombre d'opérations susceptibles d'être en panne (noté $Nb_{pot_dé faill}^{Op}$). Ces opérations potentiellement défaillantes sont les opérations élémentaires privées des opérations de type stockage passif, stockage actif réalisé par une ressource de transformation (cf. §2.3.2) et contrôle. L'indice de criticité absolu par opérations dénombre, parmi toutes les fonctions potentiellement défaillantes mises en oeuvre par les ressources de l'architecture, celles dont la panne entraîne la disparition d'au moins une fonction de transformation du SFPM. Son expression est la suivante:

$$Ic^{Op} = \frac{Nb_{crit}^{Op}}{Nb_{pot_de\ faill}^{Op}}$$

3.1.1.2 Indice de criticité absolu par ressources

Cet indice, similaire au précédent, concerne les ressources. Il se définit comme suit :

$$Ic^{R} = \frac{Nb_{crit}^{R}}{Nb_{pot, dé faill}^{R}}$$

Exemple: $Ic^R = 0.5$ signifie que 50% des ressources potentiellement défaillantes de l'architecture ont une influence critique sur les fonctions de transformation délivrées par le SFPM.

Des études, présentées dans la prochaine section, montrent que plus ces indices sont élevés, plus l'architecture est proche d'une ligne de production sans aucune flexibilité (aussi appelée ligne de transfert).

3.1.2 Evaluation de la sévérité d'une panne

L'ensemble de critères suivant s'intéresse à l'influence des éléments critiques. Les critères sont définis à partir du degré de criticité des éléments de l'architecture.

3.1.2.1 Taux de criticité moyen par opérations critiques

Le taux de criticité moyen par opérations critiques exprime le nombre moyen de fonctions de transformation, rapporté au nombre total des fonctions de transformation délivrées par le SFPM (noté Nb_{fct_transf}), que le système n'est plus en mesure de proposer lorsqu'une opération critique est en panne. Son expression est la suivante :

$$\overline{Tc^{Op}} = \frac{\sum_{Op_crit.} d_{Op}}{Nb_{fct_transf.} \times Nb_{crit.}^{Op}}$$

 $\overline{Tc^{op}} = 0.5$ signifie que, parmi toutes les opérations critiques dénombrées, la disparition de l'une d'elles entraı̂ne en moyenne une perte de 50% des fonctions de transformation délivrées par le SFPM.

3.1.2.2 Taux de criticité moyen par ressources critiques

Le taux de criticité moyen par ressources critiques est similaire au précédent. Il évalue l'impact moyen de la disparition d'une ressource critique. Sa formule est la suivante :

$$\overline{Tc^R} = \frac{\sum_{\text{Res_crit.}} d_R}{Nb_{fct_transf.} \times Nb_{crit}^{\text{Res}}}$$

3.1.2.3 Taux de criticité maximal par opérations / ressources critiques

Ces critères sont proposés de façon à quantifier le risque qui résulte de la disparition d'une entité critique. Ils se placent dans les cas les plus défavorables.

$$Tc_{\max}^{Op} = \frac{Max^{(d_{Op})}}{Nb_{fct_transf}}$$
; $Tc_{\max}^{R} = \frac{Max^{(d_{R})}}{Nb_{fct_transf}}$

Lorsque Tc_{max}^R vaut 1, cela signifie qu'il existe une ressource dont la panne va complètement paralyser le SFPM.

Ces critères permettent de comparer une portion d'architecture au cas d'une architecture série. Par exemple, si Tc_{\max}^{Op} est proche de 1 alors la portion de l'architecture à laquelle appartient l'opération $\operatorname{Op}_{\operatorname{Ri-fj}}$ telle que $d_{\operatorname{Op}_{Ri-fj}} = Tc_{\max}^{Op} \times Nb_{fct_transf}$ a une tolérance similaire à celle d'une architecture purement série. Les entités dont le taux de criticité est égal au taux max. sont donc à surveiller en priorité.

3.2 Prise en compte d'une production donnée [BER 98/a]

Les critères prennent en compte la nature des produits circulant dans l'architecture. Seules les entités critiques par rapport aux fonctions de transformation effectivement sollicitées sont considérées.

3.2.1 Indice de criticité par opérations relativement à une gamme logique

L'indice de criticité par opérations relativement à une gamme logique (GL) représente le nombre d'opérations dont la panne va empêcher la réalisation de la GL, rapporté au nombre d'opérations potentiellement défaillantes. Son expression est la suivante :

$$Ic^{Op/GL} = \frac{card(E_{Opc}^{GL})}{Nb_{opt,diff}^{Op}} \text{ avec } E_{Opc}^{GL} = \bigcup_{f \in GL} \left\{ Op_{crit/fi} \right\}$$

 E_{Opc}^{GL} est calculé de façon à ne compter qu'une fois une opération à la fois critique/ f_1 et critique/ f_2 .

Il faut remarquer que la GL peut être achevée en une ou plusieurs fois. Il peut être nécessaire de remettre en entrée la pièce afin de poursuivre sa fabrication. En effet, la notion de tolérance est fondée uniquement sur la disponibilité des fonctions de transformations relatives à la GL. Elle n'implique pas que ces fonctions de transformation puissent s'enchaîner au sein du SFPM. En fait, la notion de tolérance est une condition nécessaire quant à la réalisation d'une GL. La condition est suffisante lorsque la sortie du SFPM reboucle sur son entrée.

3.2.2 Indice de criticité par ressources relativement à une gamme logique

Cet indice, similaire au précédent, concerne les ressources. Il se définit comme suit :

$$Ic^{R/GL} = \frac{card(E_{Rc}^{GL})}{Nb_{pot,disfall}^{R}} \text{ avec } E_{Rc}^{GL} = \bigcup_{fi \in GL} \left\{ R_{crit/fi} \right\}$$

3.3 Prise en compte de données stochastiques

Alors que les précédents critères sont plutôt de type dénombrement, nous nous intéressons à relier plus étroitement la notion de criticité avec la notion de panne. Par rapport à une étude déterministe, une analyse stochastique permet de s'affranchir d'une étude énumérative des cas. Il semble donc adapté afin rendre compte de l'occurrence d'une panne sur le SFPM. Il faut bien sûr se placer dans un cadre d'hypothèses. Les événements sont supposés incompatibles, c'est-à-dire que la panne d'une entité n'est pas corrélée avec la panne d'une autre entité. Ainsi, les entités prises en compte sont les ressources. Dans ce cas, pour une panne du SFPM, la probabilité de panne d'une ressource, sachant que toutes les autres ne sont pas défaillantes, est égale à sa probabilité de panne obtenue classiquement à partir de son taux de panne. Un calcul similaire pourrait être réalisé à partir des opérations, mais la probabilité de panne d'une opération, sachant que toutes les autres ne sont pas défaillantes, est plus difficile à obtenir.

Les critères suivants prennent en compte, en plus des connaissances des éléments critiques, des événements aléatoires comme des pannes. Certaines disproportions entre éléments du SFPM sont ainsi considérées.

3.3.1 Indice de criticité absolu pondéré par ressources

Pour obtenir ce critère, calculons la probabilité qu'une fonction disparaisse, sachant qu'une panne affecte une ressource du SFPM (notée $P(f/\Sigma)$). Cette dernière est égale à la probabilité qu'une ressource critique soit en panne, sachant qu'une des ressources du SFPM est défaillante. D'après nos hypothèses sur les événements de panne, si une panne affecte le système Σ , elle affecte alors une seule des ressources. On obtient donc :

$$P(\Sigma \text{ soum is à 1 panne}) = \sum_{ressources} P(R_i \text{ en panne})$$
. Il s'ensuit :

$$P(f \mid \Sigma) = \frac{\sum_{ressources_crit.} P(R_i \text{ en panne})}{\sum_{ressources_du_SFPM} P(R_j \text{ en panne})}$$

Nous obtenons un résultat similaire au critère Ic^R , pondéré par la probabilité d'occurrence d'une panne sur une ressource, noté $Ic^R_{pr}(t)$.

3.3.2 Taux de criticité moyen pondéré par ressources critiques

Le taux de criticité moyen précédemment défini est pondéré de façon à obtenir un résultat tenant compte de la probabilité d'occurrence d'une panne. Si une ressource a un risque plus important de tomber en panne, elle influera avec un poids plus important sur le nombre moyen de fonctions qui vont disparaître quand une panne affecte une ressource critique du SFPM.

Calculons le nombre de fonctions de transformation (\overline{N}) qui risquent de disparaître, sachant qu'une ressource critique est en panne. Ce nombre est égal au nombre de fonctions de transformation qui disparaissent, quand la ressource critique R_1 est en panne, ou au nombre de fonctions de transformation qui disparaissent, quand la ressource critique R_2 est en panne, etc..., sachant qu'une ressource critique est en panne. Il résulte que :

$$\overline{N} = \frac{\sum_{ressources_crit.} d_{Ri} \times P(R_i \text{ en panne})}{\sum_{ressources_crit.} P(R_i \text{ en panne})}$$

En divisant \overline{N} par le nombre de fonctions de transformation délivrée par le SFPM, nous obtenons le taux de criticité moyen pondéré par les probabilités de panne des ressources critiques noté $\overline{Tc_{pr}^R}(t)$.

3.4 Exemple

Nous considérons le GAO Figure IV-16 représentant le SFPM Figure IV-14. Les taux de panne des ressources sont donnés par le tableau ci-dessous.

Le GAO est constitué de 38 opérations potentiellement défaillantes. La procédure a identifié 6 opérations critiques (2 opérations critiques/ f_1 , critiques/ f_2 et critiques/ f_3 , et 6 opérations critiques/ f_2). L'architecture possède 8 ressources. Les ressources critiques sont au nombre de 4 (3 ressources critiques/ f_1 , critiques/ f_2 et critiques/ f_3 , et 1 ressource critique/ f_2). Le SFPM est de plus supposé fabriquer des pièces de type P_1P_2 et P_1P_3 dont les GL respectives sont f_1f_2 et f_1f_3 .

En se référant aux résultats présentés au §2.3.2, les critères ont les valeurs suivantes :

$$Ic^{Op} = 0.16;$$
 $\overline{Tc^{Op}} = 0.56;$ $Tc^{Op}_{max} = 1;$
 $Ic^{R} = 0.5;$ $\overline{Tc^{R}} = 0.67;$ $Tc^{R}_{max} = 1;$

Ces valeurs montrent que les opérations critiques ne sont pas extrêmement nombreuses, mais que leur impact est conséquent. Les ressources critiques sont proportionnellement plus

nombreuses et leur impact plus conséquent. De plus, le SFPM possède au moins une entité (opération et ressource) dont la panne va complètement le paralyser.

$$Ic^{Op/f_1f_2} = 0.16;$$
 $Ic^{R/f_1f_2} = 0.5;$ $Ic^{Op/f_1f_3} = 0.02;$ $Ic^{R/f_1f_3} = 0.38;$

Nous notons que les valeurs des critères relatifs à f_1, f_2 sont identiques aux critères dans l'absolu. Ceci résulte du fait que dès qu'une entité est identifiée comme critique, elle l'est au moins par rapport à f_2 . Les critères relatifs à f_1, f_3 prennent des valeurs inférieures. Ceci est en partie induit par la redondance des ressources M1 et M2.

Pour les applications numériques concernant les probabilités de panne, nous supposons que les pannes ont une distribution aléatoire exponentielle de densité de probabilité λ constante. Le tableau Figure V-5 résume les valeurs prises. Les probabilités sont calculées pour un temps de fonctionnement T=1000h.

	Cv	R11	R12	R13	R14	Ml	M2	M3
$\lambda_R' \times 10^5$	10	15	25	15	15	35	45	40

Figure V-5: Taux de panne relatifs à l'exemple Figure IV-14 (p 123)

$$Ic_{pr}^{R}(1000) = 0.41; \quad \overline{Tc_{pr}^{R}}(1000) = 0.56;$$

Ces valeurs montrent que la probabilité pour que le système perde au moins une fonction de transformation est de 41%. Si une ressource critique est en panne, cette panne fait disparaître presque 2 fonctions sur les 3 initialement délivrées.

4. Applications des critères de tolérance

Cette section s'intéresse maintenant à montrer quelques applications des critères précédemment définis. La première utilisation renvoie à la procédure présentée Figure V-2. A partir de seuils fixés, le concepteur de l'architecture vérifie que celle-ci a bien une tolérance conforme aux exigences de départ. Une deuxième utilisation s'appuie sur la comparaison systématique de la tolérance d'architectures types, dont on fait varier certains paramètres. Cette démarche, expérimentale, aboutit à des règles de conception heuristiques.

D'une façon plus générale, l'évaluation de la tolérance donne lieu à une analyse des architectures flexibles du point de vue de sa flexibilité. Puisque la flexibilité et productivité ont longtemps été opposées, nous situons la tolérance par rapport à la productivité. Nous montrons qu'un compromis est à trouver dans une analyse multi-critères des architectures.

4.1 Etablissement de règles de conception

Nous présentons dans cette section quelques règles permettant concevoir une architecture tolérante aux pannes. Ces règles sont issues d'une démarche expérimentale qui est tout d'abord introduite.

4.1.1 Démarche expérimentale

Cette démarche est résumée par la Figure V-6.

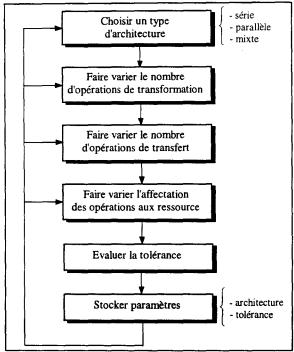


Figure V-6 : Démarche expérimentale

Cette procédure permet de faire varier les redondances et les flexibilités de l'architecture. Elle est appliquée pour un nombre de fonctions de transformation donné. L'évolution des critères de tolérance est étudiée en fonction de la variation des paramètres.

4.1.2 Quelques résultats

Les résultats sont déduits de l'analyse d'architectures de type série et parallèle, toutes composées de 2 ressources de transformation. Pour chaque type, les cas suivants ont été étudiés [BER 97/c] :

- cas 1: f₁ exécutée par M1, f₂ exécutée par M2;
- cas 2: f₁, f₂ exécutée par M1, f₁ exécutée par M2;
- cas 3: f₁, f₂ exécutée par M1, f₁, f₂ exécutée par M2.

Les résultats les plus caractéristiques sont résumés par la Figure V-7.

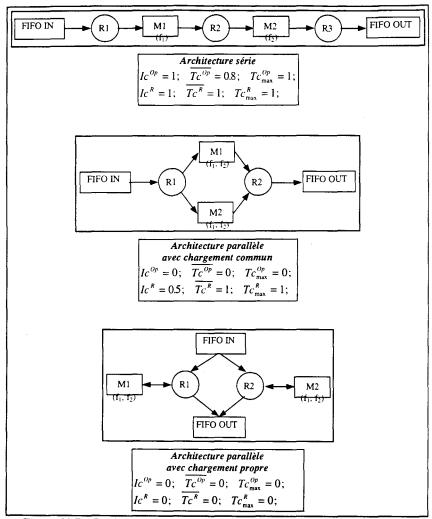


Figure V-7: Evaluation de la tolérance d'architectures types [BER 98/d]

Nous constatons que l'architecture série sans redondance n'est pas tolérante du tout. Ce résultat, qui était assez attendu, nous permet de donner la règle suivante :

Règle 1: Il faut éviter de placer une ressource de transformation avec un taux de panne élevé dans une portion d'architecture en série.

Des études de disponibilité ont d'ailleurs suggéré de limiter le nombre de postes en série à 10, auquel cas le taux d'indisponibilité de la ligne devient prohibitif [BON 87]. Cette démarche conduit à fractionner les lignes de production et à mettre en place de flexibilités ou bien des stocks tampons conséquents.

La tolérance de l'architecture augmente si les ressources de transfert sont redondantes. Ceci montre l'intérêt de mettre en place un système de transport flexible. Mais, si chaque fonction de transformation n'est mise en oeuvre que par une seule opération, la flexibilité de routage a ses limites. Il convient donc d'adopter certaines redondances pour les ressources de transformation (tout du moins au niveau des fonctionnalités).

<u>Règle 2</u>: La tolérance de l'architecture augmente lorsque des fonctions de transformation sont mises en oeuvre par plusieurs ressources.

Si du parallélisme existe dans l'architecture, les critère montrent qu'une architecture avec ressource de transfert mettant en oeuvre à la fois le chargement et le déchargement de la ressource de transformation est plus tolérante que dans le cas où le chargement est réalisé par une ressource et le déchargement par une autre. Cette règle a son intérêt pour la mise en place des ressources de transfert.

<u>Règle 3</u>: Le chargement et le déchargement d'une ressource de transformation doivent être exécutée par la même ressource de transfert. Il y a intérêt à associer une ressource de transfert à une resource de transformation.

Ces considérations ne sont bien sûr pas exhaustive. Il convient de poursuivre la démarche.

4.2 Analyse des architectures flexibles

Les critères présentés permettent d'analyser l'architecture du point de vue de sa capacité à rendre disponible de différentes manières ses fonctions de transformation. Ils touchent donc la flexibilité.

4.2.1 Tolérance et flexibilité

La tolérance donne une borne supérieure des degrés de liberté qui pourront être utilisés pour réagir face aux aléas. Ces degrés peuvent en effet être restreints par la politique prévisionnelle (ordonnancement, maintenance préventive) et ne pas être utilisables en exploitation.

4.2.1.1 Tolérance : une mesure de la flexibilité

Les critères sont interprétés comme donnant une mesure de la flexibilité potentielle de l'architecture en tenant compte à la fois de l'organisation et de la coopération des ressources. La flexibilité, que nous avons regroupée sous les termes de flexibilité d'architecture et de flexibilité au niveau ressource (cf chapitre I §1.2.2), est évaluée.

Ces mesures complètent celles de Brill et Mandelbaum [BRI 89] et de Taymaz [TAY 89]. Ces dernières balayent un spectre plus large de types de flexibilités. Elles tiennent compte notamment du lien entre flexibilité et productivité en proposant une mesure de la flexibilité de production. Mais elles ont principalement été appliquées à des systèmes composés d'une seule machine de transformation. De plus, aucune des mesures introduites ne tient compte du facteur de perturbation. Par l'évaluation de la tolérance, nous proposons des mesures avec une approche liée à la sûreté de fonctionnement.

Les mesures présentées tiennent aussi compte de certaines caractéristiques de pièces (comme la gamme). Il est envisagé d'étendre la démarche en intégrant comme donnée les types de pièces admises par chaque opération. Cette donnée, considérée comme une caractéristique de chaque opération, influera sur les accessibilités calculées dans le GAO. En fait tous les noeuds n'acceptant pas le type de pièce considéré seront retirés du GAO. Une mesure de la tolérance (voire de la flexibilité), dépendant des caractéristiques des pièces, est ainsi obtenue. Cette relation entre la flexibilité et le type de pièces n'est pas sans fondement puisque ces caractéristiques influences déjà la conception du SFPM [GUP 89].

Enfin, d'autres études, fondées sur l'analyse structurelle du GAO, ont permis une étude des flexibilités de routage et concernant le nombre d'opérations mettant en oeuvre une fonction [BER 97/b].

4.2.1.2 Proposition d'un classement des architectures à partir de leur tolérance

Raouf [RAO 95] a proposé une mesure d'un ensemble de flexibilités, qu'il a regroupées sous le terme "process flexibility". Cet ensemble tient compte de la possibilité d'occurrence d'une panne. La grille d'évaluation se contente principalement de classer les architectures par type (de la ligne de transfert à la machine universelle). Une valeur est affectée à chaque classe d'architecture. La connaissance de la classe d'architecture détermine la valeur à donner pour la flexibilité de l'architecture considérée.

Nous proposons d'utiliser le raisonnement inverse. Cette grille est adaptée de façon à permettre de savoir de quel type d'architecture, l'architecture actuellement évaluée se rapproche (cf Figure V-8). Trois grandes catégories sont retenues :

- 1. architecture à faible redondance (architecture plutôt de type série);
- 2. architecture avec redondance partielle (architecture série avec système de transport redondant ou architecture parallèle sans redondance du système de transport);
- 3. architecture avec redondance totale (architecture parallèle redondante).

Valeur tolérance	Catégorie architecture				
[0, 0.25]	redondance faible				
[0.25, 0.75]	redondance partielle				
[0.75, 1]	redondance totale				

Figure V-8: Tableau de classement des architectures

Le classement de l'architecture se fait à partir de la valeur trouvée pour sa tolérance. Dans la Figure, la correspondance est réalisée pour des valeurs de $1-(Ic^R \times \overline{Tc^R})$. La mesure pourra être complétée par la prise en compte d'autres critères.

4.2.2 Tolérance et productivité

D'après ce qui précède, nous retrouvons le dilemme existant entre productivité et flexibilité. Une meilleure tolérance résulte de la mise en place de redondances pertinentes. Un système sera d'autant plus productif que l'ensemble de ses ressources seront utilisées. Il convient cependant d'apporter un bémol.

Un système non tolérant comme une ligne de production aura une productivité très élevée... s'il n'est soumis à aucune panne. Dès qu'une panne survient, c'est la catastrophe. Le système est à l'arrêt. Tant que l'élément en panne n'est pas réparé, la productivité est nulle. Un SFPM tolérant admettant certaines redondances est assurément moins performant quant à l'utilisation de ses ressources qu'une ligne. La productivité de ce système est donc inférieure à celle du premier SFPM. En revanche, une panne peut n'affecter que légèrement cette productivité. La réaction face à la panne est supportée par la supervision et plus précisément par le recouvrement qui choisit la nouvelle configuration du SFPM. A terme, la productivité du second système s'avère meilleure (cf. Figure V-9).

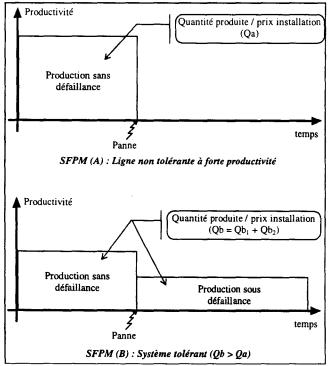


Figure V-9: Intérêt d'un système tolérant du point de vue production

Ces remarques viennent en complément d'études stipulant qu'une augmentation de la flexibilité de routage dans les convoyeurs circulaires, par la mise en place de zones tampon autorisant des échanges de pièces, peut s'avérer efficace pour la productivité générale du système [AFE 90]. D'autres études, notamment en ordonnancement, ont montré les avantages de prévoir des opérations alternatives [GUP 93]. De meilleures performances, fondées sur des critères de durée totale de production et de taux d'utilisation des ressources, sont obtenues

grâce à une plus grande disponibilité des ressources. Ainsi, tolérance et productivité ne doivent pas être opposés.

De plus, un système tolérant, moins sensible aux aléas, pourra satisfaire certaines priorités de production. L'entreprise évite ainsi de ternir son image vis à vis des clients, par le non-respect des délais, lorsque des pannes affectent son système de production.

4.2.3 Vers une analyse multi-critères des architectures

Nous avons fourni des critères permettant d'analyser la tolérance des architectures. Il ressort des études présentées dans ce mémoire qu'un système sera d'autant plus tolérant que la redondance des éléments qui le composent est importante. La tolérance a nécessairement un coût. Au sein d'une phase de conception d'architectures, les critères proposés sont donc à confronter à des critères économiques, relatifs au nombre de fonctions délivré, relatifs à la gestion de production, ... dans une analyse multi-critères globale.

En conception, les études s'intéressant à l'agencement des ressources de transformation, de façon à minimiser la distance et le temps de transfert, utilisent déjà ce type d'analyse. La connaissance de la tolérance est une donnée supplémentaire à prendre en compte. En fait, nous voyons l'intégration des données de tolérance dans un logiciel proposant différentes configurations, qui sont ensuite validées par le concepteur.

Il est clair qu'une difficulté réside dans ce type d'analyse. La prise de décision finale relève souvent du concepteur. Mais cette difficulté ne fait que traduire la complexité des SFPM.

CONCLUSION

Concernant les SFPM, la notion de tolérance a été définie par rapport à la sûreté de fonctionnement de ces systèmes. La tolérance rejoint donc la disponibilité. Ainsi, un SFPM tolérant conserve la disponibilité de ses fonctions de transformation malgré la défaillance d'un de ses éléments. La criticité, introduite à l'issue de la tolérance, s'attache aux éléments sensibles. Comme pour les facteurs d'importance, son étude a pour finalité de déterminer directement les éléments à prendre en compte pour améliorer la disponibilité du SFPM.

Nous avons montré que l'étude de la tolérance passe par une phase d'analyse de conséquences des pannes, ce qui nécessite l'utilisation d'un modèle. Ce dernier, appelé GAO a été intégralement défini au chapitre IV. Il s'agit d'un graphe dont les noeuds sont composés d'opérations et dont les arcs représentent les relations d'accessibilité entre opérations.

Les caractéristiques ajoutées aux opérations, permettant d'évaluer la tolérance, sont en grande partie fondées sur la notion d'accessibilité dans un graphe orienté et sur l'interprétation du GAO en tant qu'ensemble d'opérations. Leur mise à jour fait l'objet de traitements spécifiques faisant appel à la théorie des graphes. Ce modèle a permis de déterminer les opérations / ressources critiques, et de quantifier leur criticité, ce qui nous a affranchi du calcul des facteurs d'importance. Ces éléments critiques devront faire l'objet d'une surveillance particulière, en utilisant des techniques de maintenance préventive ou prédictive. Le concepteur pourra aussi les rendre moins critiques par la mise en place de redondances pertinentes.

Afin de poursuivre l'évaluation de la tolérance d'une architecture, des critères, fondés sur la connaissance des éléments critiques, ont été définis. Pour les opérations /ressources, trois types ont été proposés :

- Les critères de type dénombrement déterminent dans l'absolu la criticité du SFPM. Ce type de critère détermine une proportion d'éléments sensibles, sans tenir compte de la fragilité intrinsèque à un élément;
- Les critères prenant en compte une production donnée font aussi du dénombrement, mais ils permettent d'évaluer ce que sera la tolérance du système lorsque ce dernier est en exploitation, à un instant donné;

3. Les critères intégrant des données probabilistes prennent en compte la notion de panne. Dans ce cas, la signification de ces critères est à mettre en rapport avec les probabilités conditionnelles. Ces critères ont été précisés pour les ressources. Ils peuvent aussi concerner les opérations, mais les probabilités de panne d'une opération, sachant que les autres ne sont pas en panne, sont plus difficiles à évaluer.

Ces indicateurs sont premièrement utilisés pour aider le concepteur à valider l'architecture du point de vue de sa tolérance. Nous avons aussi montré comment ils peuvent être utilisés afin d'en déduire des règles de conception d'architectures tolérantes aux pannes. La démarche proposée est fondée sur une évaluation systématique de la tolérance d'architectures types, dont on fait varier les paramètres. Il est clair qu'une bonne tolérance va résulter de la mise en place de redondances pertinentes. Ainsi, la tolérance a un coût, qu'il ne faut pas négliger. Les critères de tolérance sont donc à confronter avec d'autres critères de type économique, relatifs à la gestion de production, etc... Il est important de garder présent à l'esprit que la tolérance n'est pas une fin en soi et que les indicateurs proposés doivent être utilisés dans une analyse multi-critères.

Nous notons également que la tolérance est en étroite relation avec la flexibilité d'architecture et la flexibilité au niveau ressource (au chapitre I). Ainsi, les valeurs numériques de ces critères permettent de donner une mesure de la flexibilité de l'architecture, chose qui avait toujours été assez délicate à quantifier. A partir de là, ces critères permettent de classer les architectures par types. Nous avons proposé une grille de classement qu'il conviendra de faire évoluer.

Fort de la prise en compte de la tolérance, lors de la conception de l'architecture, ce qui nous permet de concevoir une architecture admettant suffisamment de degrés de liberté, nous abordons maintenant la partie C concernant la reconfiguration. Cette partie va présenter la fonction qui décide de l'utilisation de telles flexibilités, lorsqu'une panne survient. Cette fonction de recouvrement va tirer le meilleur parti de ces degrés de liberté afin de réagir face à une panne. Nous complétons ainsi la boucle de réaction supportée par la supervision.

PARTIE C

La reconfiguration des SFPM

INTRODUCTION

Cette partie détaille l'approche active, consistant à minimiser l'effet d'une défaillance sur le fonctionnement du SFPM. Cette approche est essentiellement supportée par la supervision. Comme il a été présenté dans la partie A, les prises de décisions sont du ressort du recouvrement. Le point principalement abordé concerne la reconfiguration, qui consiste à réorganiser le SFPM de façon à permettre une continuité de production, malgré la réduction du potentiel productif dû à la panne.

La partie C se compose des chapitres VI et VII.

Après avoir caractérisé la reconfiguration et différencié l'aspect décisionnel de l'aspect opérationnel, le chapitre VI détaille le rôle du recouvrement dans la recherche d'une nouvelle configuration. L'analyse des stratégies de recouvrement, complétée par un classement des types de reconfigurations, permet de proposer une décomposition du recouvrement en fonctions élémentaires pour la recherche d'une nouvelle configuration.

Le chapitre VII s'intéresse à la mise en oeuvre des fonctions élémentaires du recouvrement. Cette mise en oeuvre est fondée sur l'utilisation en-ligne du GAO, modèle précédemment défini pour l'approche passive. A ce titre, le GAO est enrichi (des caractéristiques sont ajoutées aux opérations) afin d'être utilisé dans une procédure de recherche de configuration. Il permet d'intégrer le recouvrement avec la gestion des modes, la commande et la surveillance. Comme le GAO est un système d'information, cette intégration est essentiellement informationnelle.

Les mécanismes permettant de renseigner les caractéristiques des opérations du GAO sont présentés. Le principe de recherche de configuration consiste à étudier, après une panne, les chemins qu'une pièce peut encore emprunter dans une architecture où des ensembles de ressources sont progressivement pris en compte, pour réaliser une gamme. Le problème se ramène donc à une recherche de chemin dans un graphe orienté. En fonction de critères, ces chemins sont ensuite évalués. Ce choix permet de définir la nouvelle configuration du SFPM, tant au niveau des ressources qu'au niveau de la commande.

Chapitre VI:

Reconfiguration

et

structuration du recouvrement

Ce chapitre traite de la reconfiguration.

Une première section en caractérise les principes. Différents types de reconfiguration sont déterminés en fonction de la difficulté de mise en oeuvre par les modules opérationnels. L'accent est ensuite mis sur le rôle décisionnel du recouvrement, dont l'objectif est de rechercher une nouvelle configuration.

Les stratégies de recouvrement sont étudiées dans le contexte du projet CASPAIM. Une structuration du recouvrement est présentée afin d'élaborer des décisions orientées par les stratégies définies.

1. Caractérisation de la reconfiguration

1.1 But et principe de la reconfiguration

Selon l'AFNOR [AFN 91], la reconfiguration est un processus de réorganisation physique ou logique des postes de travail en terme d'implantation ou d'allocation à des produits et/ou des activités. Elle peut aussi bien s'intéresser à l'organisation de la commande qu'à celle du procédé. La définition souligne bien les deux points de vue : tâches et produits. Il convient d'en préciser l'objectif.

La reconfiguration est un processus complexe dont le but est de faire face à une réduction du potentiel productif induit par une défaillance sur le SFPM. C'est un moyen de maintenir la disponibilité du système au même titre que le passage en mode dégradé. Mais le résultat sur le SFPM est différent quant à l'organisation des ressources du SFPM.

<u>Définition</u>: Reconfigurer consiste à poursuivre la mission en changeant l'organisation du SFPM, voire ses objectifs de production. Nous considérons ici la mission du SFPM au sens de : produire ce qui a été planifié à moyen terme.

Le processus de réorganisation du SFPM se traduit le plus souvent par un changement des modes d'exploitation de certaines ressources du système. Par exemple, des ressources peuvent être mises en mode d'exploitation {Au repos} et arrêtées, d'autres sont mises en marche et en mode d'exploitation {Production}. Des fonctionnalités d'une ressource, autres que celles initialement requises, peuvent être sollicitées.

Compte tenu de l'hypothèse de pannes complètes, nous parlerons de reconfiguration lorsque les modes d'exploitation, voire les modes de marche, d'arrêt et de fonctionnement (cf. chapitre II §1.2.4) de certaines ressources sont modifiés. Nous n'étudierons cependant pas le cas où l'ensemble du système est mis à l'arrêt, que nous considérons comme une option différente de la reconfiguration (cf. chapitre II §2.2.3).

1.2 Le processus de reconfiguration

Le processus général de reconfiguration implique plusieurs points de vue, liés aux différents systèmes (informationnel, décisionnel, opérationnel) qui composent l'activité de réaction de la supervision (cf. chapitre II §1.1.2). Cette décomposition en deux aspects (décisionnel et opérationnel) est assez proche de celles du LAAS [COM 91], [BON 93], et du LAMIH [RAM 96], [MAB 96].

1.2.1 Aspect décisionnel

Du point de vue décisionnel, le rôle de la reconfiguration consiste à définir la nouvelle configuration du SFPM. Il est confié au recouvrement. La décision est fondée sur les informations concernant la défaillance (nature, durée d'immobilisation des ressources affectées) fournies par la surveillance et le module de décision de la maintenance [LY 97]. Elle utilise aussi des informations concernant les productions en cours et les potentialités de l'architecture. Il s'agit pour le recouvrement de déterminer les ressources à mettre en fonctionnement, celles à arrêter, les opérations (au sens défini aux chapitres II et IV) à réaliser, ainsi que les pièces à produire. Il détermine également le devenir des produits présents dans l'architecture au moment de la défaillance.

Remarque : il se peut que le recouvrement décide de ne pas mettre en marche de nouvelles ressources du SFPM. Dans ce cas, il demande seulement l'arrêt des ressources défaillantes. Comme le SFPM n'est plus dans sa configuration d'origine, nous considérons qu'il y a quand même reconfiguration, même si elle est mineure.

1.2.2 Aspect opérationnel

La reconfiguration est vue ici comme un ensemble d'actions permettant de réorganiser la partie opérative et la commande du SFPM. Ce rôle, essentiellement applicatif, intervient directement après la phase décisionnelle du recouvrement. Dans notre cas, la gestion des modes et le pilotage ont la charge d'appliquer les décisions du recouvrement; la gestion des modes pour ce qui a trait aux ressources de l'architecture et le pilotage pour ce qui concerne l'application de ratios intéressant certaines opérations, pour le paramétrage de la commande (cf Figure VI-1).

La gestion des modes agit sur les ressources, via leur commande, afin de les mettre dans un mode de marche, d'arrêt et d'exploitation particulier. La gestion des états intermédiaires par lesquels il faut transiter est aussi assurée. Lorsqu'il y a un indéterminisme de commande, le pilotage agit sur la commande, compte tenu des données fournies par le recouvrement. Il intervient quand une pièce doit changer de ressource et emprunter un nouveau chemin dans l'architecture, après que les ressources ont été mises dans les modes de marche et d'exploitation appropriés. Le pilotage va plutôt être impliqué dans la reconfiguration de la commande.

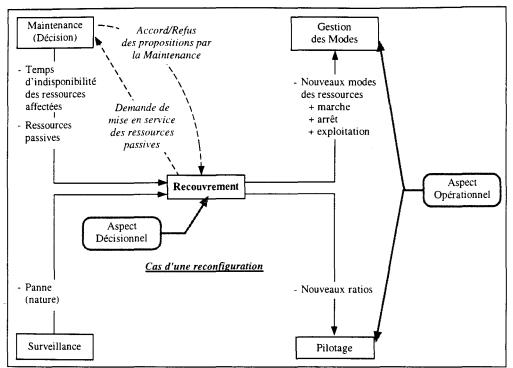


Figure VI-1 : Interactions des modules décisionnels et opérationnels pour l'élaboration d'une reconfiguration

La reconfiguration de la commande consiste, à partir de nouvelles données concernant les ressources mises en oeuvre, à considérer de nouvelles Gammes Opératoires (GO). Deux cas s'offrent à nous :

- 1. Les GO n'existent pas au départ et il faut les élaborer ;
- 2. Les GO sont déjà existantes. Elles sont rendues actives au niveau du module de coordination de la commande lorsque la gestion des modes met en mode d'exploitation {Production} les ressources participant à la production. Les indéterminismes résultants sont levés par le pilotage, comme indiqué ci-dessus. Dans ce cas, certains travaux considèrent qu'il s'agit d'un réordonnancement local (rescheduling [HAN 96]) de façon à minimiser l'effet de la panne. Cela nécessite cependant que toutes les ressources soient au départ dans le mode d'exploitation {Production}, en attente d'une pièce.

<u>Précision</u>: Dans la suite, la reconfiguration au sens décisionnel du terme sera considérée. Nous parlerons de procédure de recherche de configuration.

1.3 Contraintes de la reconfiguration

La décision de reconfigurer, issue du recouvrement quand l'état du procédé est différent au point de ne plus permettre de continuer les séquences d'opérations actuelles, implique des changements au niveau du procédé et de la commande. Nous remarquons certaines similitudes avec l'élaboration d'une commande optimisée (construite conjointement par la partie commande et par l'ordonnancement), mais le contexte est différent. Des produits sont en effet

présents dans le SFPM, au moment de la panne. Le potentiel productif est de plus réduit par la panne.

Les effets de la reconfiguration sont perçus selon différents niveaux. Sur le plan de l'architecture, la reconfiguration est vue comme un changement de modes des ressources. Du point de vue des produits, elle est perçue comme une modification des séquences d'opérations prévues afin de réaliser leur production. Sur le plan de la commande, c'est un changement au niveau de la coordination des ressources et / ou de la commande locale.

Il résulte ainsi des contraintes générales relatives à toute prise de décision et des contraintes spécifiques à une décision concernant les produits et les modes. Celles liées à la commande sont sous-jacentes.

1.3.1 Contraintes générales

Sans degré de liberté, aucune réaction n'est possible. La reconfiguration nécessite donc d'avoir un SFPM possédant des potentialités notamment au niveau de son architecture. Le lien avec la tolérance, abordée en partie B, est direct. La connaissance de ces degrés de liberté doit être globale afin de prendre en compte l'ensemble des potentialités au niveau de l'organisation des opérations de l'architecture.

La reconfiguration requiert une connaissance du procédé (état, potentialités), de la commande (état, opérations en cours), et des produits (état, prochaines opérations) au moment de la défaillance. En fait, les besoins informationnels sont ceux énoncés au chapitre II §3.1.1 pour le recouvrement.

Bien que la reconfiguration amène des changements profonds de l'architecture, le temps de reconfiguration (calcul et application des séquences) ne doit pas être prohibitif. Il y a donc intérêt à avoir prévu des commandes au niveau du module de coordination des ressources.

La solution recherchée, permettant de palier aux effets de la panne, doit être optimisée, afin de perturber au minimum le plan de production. En revanche, elle doit tenir compte d'un nombre plus restreint de critères que l'ordonnancement, qui est un problème NP difficile, dont la résolution est coûteuse en temps.

1.3.2 Contraintes spécifiques aux produits

Pour chaque produit présent dans l'architecture au moment de la panne et chaque série de produit à venir, le recouvrement propose une séquence d'opérations effectivement réalisables par le SFPM, compte tenu de la panne.

Les produits présents dans l'architecture peuvent avoir été affectés par la défaillance. Il se peut qu'ils nécessitent un contrôle de leur fabrication. Ils doivent être traités au cas par cas. Ces produits risquent d'avoir leur évolution et leur commande modifiée. La commande concernant ces produits étant existante, il faut veiller à la bonne mise à jour des modèles de commande lors du changement. Plus généralement, il faut veiller à la cohérence des modèles entre eux et avec l'état actuel du SFPM.

1.3.3 Contraintes spécifiques aux modes

Au niveau de l'architecture, la reconfiguration est vue comme un changement de modes des ressources. Lorsqu'un mode est choisi pour une ressource, il doit être compatible, à un instant donné, d'une part avec les modes des autres familles de modes, d'autre part avec les modes des ressources qui sont liées par leurs contraintes de comportement. Nous soulignons l'intérêt de découpler les problèmes décisionnels et opérationnels. La contrainte énoncée est prise en considération par la gestion des modes. Ainsi, le recouvrement ne fournit que les modes de marche, d'arrêt et d'exploitation des ressources dans l'état objectif. Le passage de l'état courant à l'état objectif est assuré par la gestion des modes. Dans les transitoires, le fait que la ressource doit avoir été déchargée avant d'avoir son mode d'arrêt mis à {Hors-tension}, est notamment pris en compte.

1.4 Hypothèses liées au contexte CASPAIM

Nous rappelons que la commande est non-déterministe au départ. Elle est ensuite paramétrée en fonction de données de l'ordonnancement, de la gestion des modes et du pilotage.

1.4.1 Prise en compte des flexibilités

Toutes les flexibilités énoncées au chapitre I §1.2.2 sont prises en considération pour la conception de graphes de coordination de départ. Certaines branches du graphe sont ensuite interdites par la gestion des modes et par l'ordonnancement (cf. Figure VI-2). La gestion des modes retire les branches qui contiennent des places faisant référence à des ressources qui sont pas en mode de fonctionnement {Hors-service} ou qui ne sont pas en mode d'exploitation {Production}. L'ordonnancement donne une solution déterministe concernant l'affectation des ressources de transformation, ce qui permet encore de réduire les possibilités de choix. Le graphe de coordination utilisé par le pilotage recèle donc un minimum d'indéterminismes.

CHAPITRE VI: Reconfiguration et structuration du recouvrement

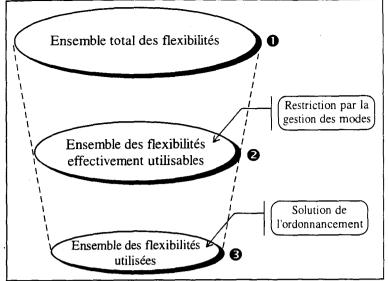


Figure VI-2 : Processus de restriction de la prise en compte des flexibilités

Ce processus d'affinement de la solution par réduction des degrés de liberté permet de stocker ces derniers sur plusieurs niveaux d'abstraction d'une hiérarchie.

1.4.2 Implication de l'ordonnancement

L'étude est fondée sur un ordonnancement prévisionnel déterministe, quant à l'affectation spatiale et temporelle des produits vis à vis des ressources de production de l'architecture [CAM 97], [KOR 98]. Le routage d'une pièce entre deux ressources de transformation peut être laissé au pilotage. Il reste donc quelques flexibilités à ce niveau. L'étude, hors-ligne, sous l'hypothèse de pannes rares, vise à déterminer une commande prévisionnelle à flux de production maximal. Etant donné que l'ordonnancement avec prise en compte des ressources est un problème Non-Polynomial [SER 89], des heuristiques, basées sur l'élaboration d'une commande cyclique [CAM 97], [KOR 98], ont été établies afin d'en réduire la difficulté et par la même occasion le temps de calcul.

D'après nos hypothèses, une panne va entraîner une remise en cause de l'ordonnancement. Le recouvrement décide donc de la nouvelle configuration de la partie opérative et des séquences d'opérations permettant de continuer à produire. La production sous cette nouvelle configuration est maintenue soit jusqu'à obtention de la quantité de produits initialement désirée, soit jusqu'à l'élaboration d'un nouvel ordonnancement, sur la base de l'état actuel du SFPM.

1.4.3 Mécanismes de reconfiguration de la commande

La reconfiguration de la commande peut être réalisée par téléchargement de programmes ou en adaptant dynamiquement la structure de la commande. Ceci nécessite d'avoir toutes les possibilités de commande, correspondant à l'ensemble • de la Figure VI-2 [TOG 92].

1.4.3.1 Reconfiguration par téléchargement de programmes

La reconfiguration par téléchargement de programmes consis à charger un autre programme que celui en cours d'exécution ou dont l'exécution est prévue. Le téléchargement de programmes est particulièrement adapté à la commande locale des ressources (niveau graphe de commande). Ces programmes ne possèdent pas d'indéterminismes et peuvent être vus, à un niveau d'abstraction donné, comme une suite séquentielle d'instructions. Lorsque le nouveau programme vient remplacer l'ancien, il faut veiller au bon placement de son pointeur d'instruction. Généralement, la phase de téléchargement est précédée d'une mise dans un état d'attente de la ressource (cf. Figure VI-3). Ainsi, le nouveau programme débutera à partir de sa première instruction.

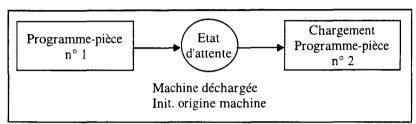


Figure VI-3: Cas d'un changement de commande locale

Par exemple, un centre d'usinage CU met en oeuvre deux types de perçages (pr_1, pr_2) et deux types de fraisage (fr_1, fr_2) . Il exécute actuellement le programme-pièce suivant fr_1, fr_2, pr_1 . Une casse d'outil entraîne l'impossibilité de mettre en oeuvre fr_1 . Il est décidé de changer de type de production. Le CU est initialisé (positionnement des axes à l'origine machine) et son nouveau programme-pièce devient pr_1, pr_2 .

Le téléchargement du programme peut être total ; l'intégralité du programme est chargée par réseau à partir d'une base de données externe. Il peut être partiel ; les programmes sont déjà présents dans la mémoire du directeur de commande de la ressource et seul un numéro de programme est transmis par réseau. Cette deuxième solution, plus avantageuse en temps, nécessite d'avoir suffisamment de mémoire au niveau du directeur de commande de la ressource pour stocker plusieurs programmes-pièces.

1.4.3.2 Reconfiguration par adaptation dynamique de la structure de la commande

L'adaptation dynamique de la structure de la commande est obtenue par la connexion et la déconnexion de séquences de commandes. Elle est particulièrement adaptée à la coordination de la commande où le processus est représenté par des GO utilisant les RdP. Dans l'approche CASPAIM, la reconfiguration au niveau coordination de la commande est obtenu par la gestion d'arcs adaptatifs ou par l'utilisation de domaines de couleurs dynamiques [BOI 91]. Toutes les possibilités de la commande sont modélisées. Pour la deuxième solution, les restrictions (aboutissant aux ensembles 2 et 3 de la Figure VI-2) sont mises en oeuvre en

utilisant un typage des arcs dont le paramétrage final est fourni par les modules opérationnels de la supervision. Il n'y a pas de problèmes de mise à jour du marquage du modèle.

La Figure VI-4 propose un exemple où deux solutions sont possibles pour réaliser une fonction d'usinage, et une seule a été retenue dans la configuration initiale. Il n'y a donc pas d'indéterminisme en fonctionnement normal. Si M1 est en panne, la reconfiguration de la commande, consistant à exécuter l'usinage sur M2, est appliquée en changeant le domaine de couleurs des arcs. Ceci revient à forcer l'utilisation d'une branche plutôt qu'une autre.

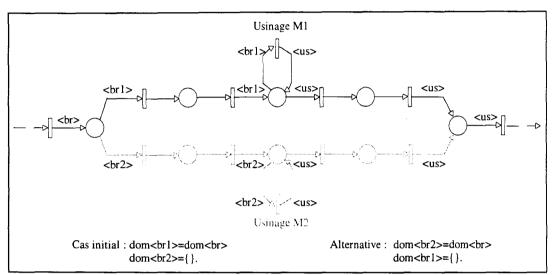


Figure VI-4: Reconfiguration par modification des domaines de couleur

1.4.4 Modes pris en compte

Parmi les familles définies au chapitre II §1.2.4, quatre nous intéressent particulièrement. Il s'agit de la famille des modes de marche, des modes d'arrêt, des modes de fonctionnement et des modes d'exploitation. Les modes privilégiés pour notre étude sont représentés par le schéma Figure VI-5. Du fait des contraintes entre modes (incompatibilité entre le mode de marche {A l'arrêt} et le mode d'arrêt {En marche}; de même pour le mode d'exploitation {Production} et les modes d'arrêt {Hors-tension} ou {Etat déterminé}, ...), nous considérons les combinaisons suivantes :

- Ressource engagée en production: {Automatique}, {En marche}, {Production} et {Normal} ou {Dégradé};
- Ressource en attente : {A l'arrêt}, {Etat déterminé}, {Au repos} et {Normal} ou {Dégradé};
- Ressource à l'arrêt: {A l'arrêt}, {Hors-tension}, {Au repos} et {Normal} ou {Dégradé} ou {Hors-service}.

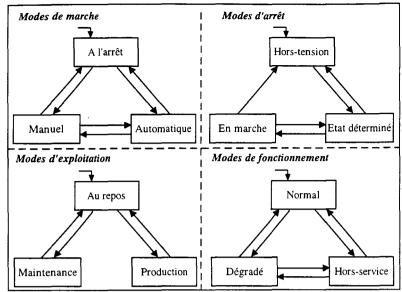


Figure VI-5 : Modes considérés

1.5 Types de reconfiguration

La décision de la réaction dépend de l'impact de la panne. Le classement suivant est établi selon la complexité de mise en oeuvre. Le temps reconfiguration est croissant en fonction des types.

1.5.1 Reconfiguration mineure

La reconfiguration mineure (type 1) consiste à reparamétrer une commande déjà active (car retenue par l'ordonnancement) au niveau du module de coordination de la commande. Au niveau des ressources, la commande locale a déjà été envisagée, il n'y a donc pas de reconfiguration à ce niveau. Le reparamétrage de la commande est réalisé en utilisant la gestion des modes et le pilotage. La gestion des modes interdit d'emprunter une branche des GO comportant des places faisant appel aux opérations {hors-service} des ressources en panne. Le pilotage lève les indéterminismes restants.

Concernant les ressources en panne, si toutes les opérations susceptibles d'être réalisées sont {hors-service}, la ressource est mise en mode de fonctionnement {Hors-service} et en mode d'arrêt {Hors-tension} par la gestion des modes ; la mise à l'arrêt des ressources fortement interdépendantes (en contraintes de coopération) est automatiquement effectuée par ce module [KER 96]. Dans ce cas, il s'agit d'un fonctionnement sans la partie de l'architecture en panne.

Si au moins une opération de la ressource en panne est {normale} et que cette opération est utilisée dans la nouvelle configuration, la ressource est mise en mode de fonctionnement {Dégradé} et en mode d'exploitation {Production} par la gestion des modes.

1.5.2 Reconfiguration significative

La reconfiguration significative (type 2) correspond principalement à une reconfiguration profonde de la commande. Il s'agit d'utiliser des ressources déjà en tension. Une portion de GO, faisant appel à ces ressources, est rendue accessible au niveau du module de coordination de la commande. Le programme pièce est chargé au niveau du directeur de commande de la ressource. Si la ressource est en attente (en tension), elle passe en production, sans phase de préparation. Sinon, elle est déjà en mode d'exploitation "Production". Le reste des mises en oeuvre est identique à la reconfiguration de type 1.

1.5.3 Reconfiguration majeure

La reconfiguration majeure (type 3) consiste à utiliser les ressources en mode de fonctionnement {Normal} ou {Dégradé}, qu'elles soient à l'arrêt ou déjà en marche (en attente ou engagée en production). Dans le dernier cas, il s'agit d'une reconfiguration de type 2. Pour les ressources en d'arrêt {Hors-tension}, la mise en route est réalisée par la gestion des modes. La ressource est mise en mode de marche {Automatique}. Elle passe du mode d'exploitation {Au repos} au mode d'exploitation {Production}, par une phase de préparation. Ce type de reconfiguration est donc plus coûteux en temps que les précédents.

Chaque type peut faire intervenir ou non des ressources affectées par une panne. Ces ressources ne réalisent plus qu'une partie de leurs opérations. On évitera, dans la mesure du possible, de remettre en production des ressources arrêtées en vue de la réparation de leurs fonctionnalités hors-service. Ceci concerne surtout la reconfiguration de type 3.

Du point de vue des potentialités de l'architecture, une reconfiguration de type 1 consiste à considérer une architecture fortement restreinte. Une reconfiguration de type 2 consiste à considérer une architecture avec moins de contraintes. La reconfiguration de type 3 équivaut à considérer l'ensemble des potentialités de l'architecture, restreint aux opérations en fonctionnement {normal}. Le classement peut être ainsi vu comme un relâchement de contraintes.

Conclusion: La reconfiguration est un processus utilisant les flexibilités potentielles de l'architecture afin de rendre disponible tout ou une partie des fonctions de transformation du SFPM et d'assurer la production des pièces planifiées. Sur l'architecture, son effet est vu comme un changement des modes des ressources. Le processus de reconfiguration est décomposé en deux étapes: une étape de détermination de la nouvelle configuration et une étape d'application de la décision. Dans la suite, nous considérons seulement l'aspect décisionnel de la reconfiguration supporté par le recouvrement. Nous nous intéressons à la

recherche d'une configuration qui puisse permettre au SFPM de continuer sa production. Nous avons présenté quelles en sont les difficultés. Nous présentons une solution dans les sections qui suivent.

2. Stratégies de recouvrement

Dans la définition énoncée pour la reconfiguration, le sens du terme mission est volontairement large (de la continuité de la production actuelle avec des taux de production proches de ceux initialement spécifiés à la disponibilité du SFPM pour une production). Il s'ensuit que le choix d'une nouvelle configuration va se faire en fonction de stratégies permettant au recouvrement de relaxer progressivement certaines contraintes afin d'atteindre un objectif réalisable.

Nous précisons les stratégies considérées par le recouvrement, afin d'élaborer une décision amenant à une reconfiguration. Celles-ci reprennent et détaillent une partie des actions envisagées pour palier à une défaillance, définies au chapitre II §2.2. Elles interviennent après les actions de gel et de mise dans un état déterminé, ayant pour objectif d'éviter la propagation de la panne et d'assurer la sécurité.

2.1 Traiter les produits présents dans le SFPM

Au moment de l'apparition de la panne, il est probable que des produits soient présents dans l'architecture de production du SFPM. Nous présentons les différentes possibilités concernant ces produits.

2.1.1 Evacuation des produits

Cette solution consiste à évacuer la pièce présente dans le SFPM quel que soit l'état d'avancement de sa transformation par rapport à sa gamme. L'évacuation peut être décidée pour l'ensemble des pièces présentes ou pour des pièces qui sont susceptibles d'avoir été endommagées par la panne (pièces qui se trouvaient sur une ressource lors de la panne de celle-ci). Elle est l'option la moins complexe à mettre en oeuvre. Elle se révèle être la plus coûteuse. En effet, des pièces semi-finies "valides" peuvent être mises en attente, voire au rebut. Cette solution garde son intérêt pour des produits à faible valeur ajoutée et dont la matière première est peu coûteuse.

L'évacuation peut être manuelle ou automatique selon l'impact de la panne sur le SFPM. En considérant le modèle GAO du SFPM, il suffit de vérifier que l'opération où se trouve le produit est non-Blq.S., pour demander son évacuation automatique. Dans le cas contraire, soit

on attend d'avoir réparé la ressource en panne pour évacuer la pièce, soit la pièce est évacuée manuellement.

2.1.2 Poursuite de la gamme

Cette solution consiste à poursuivre les étapes de transformation de la pièce présente dans le SFPM afin d'obtenir un produit fini. La poursuite de la gamme peut être décidée pour les pièces semi-usinées qui n'ont pas été endommagées par la panne. Elle est recommandée pour les pièces, dont la matière première coûte cher, ou qui ont déjà subi des usinages onéreux.

Cette solution n'est pas forcément réalisable (la panne peut avoir affecté une ressource indispensable à la réalisation de la gamme), et peut nécessiter une reconfiguration du SFPM (nouvelle affectation, nouveau routage, ...). Pour chaque pièce présente à un endroit du SFPM, il faut s'assurer qu'il existe une séquence d'opérations permettant de continuer la transformation de la pièce. En effet, la séquence des opérations à réaliser afin d'obtenir une pièce finie à partir d'une pièce semi-finie peut avoir été affectée par la panne. Cette vérification peut être effectuée grâce au GAO (cf. chapitre VII §3.3.1).

Si elle est possible, la poursuite de la gamme permet la production la plus continue. Mais elle risque d'entraîner deux reconfigurations : une pour continuer la production avec les produits semi-finis présents dans le système et une autre pour les pièces brutes entrant dans le SFPM. C'est donc une solution plus complexe à mettre en oeuvre que l'évacuation.

2.1.3 Passage par un poste de litige

L'objectif est de savoir si les pièces susceptibles d'avoir été affectées par la panne ont ou n'ont plus le degré de qualité requis, en vue de poursuivre leur transformation. Le maximum de produits semi-finis peut ainsi être récupéré. Mais cela risque d'être coûteux en temps car, après expertise de la pièce, il faut encore s'assurer que la solution est effectivement applicable.

Ces postes de litige [BON 87] sont de type banc de télémétrie, contrôle de positionnement (pour des cartes électroniques par exemple). Ils sont manuels ou automatiques. Dans ce dernier cas, l'opérateur est sollicité pour contrôler seulement les points litigieux. Après expertise, les décisions suivantes sont proposées :

- la pièce est évacuée et mise au rebut ;
- la pièce est évacuée et poursuivra sa gamme plus tard (elle sera remise en entrée du SFPM ultérieurement);

• la pièce poursuit immédiatement sa gamme (on se retrouve alors avec les contraintes énoncées au § précédent).

L'application de l'une de ces options nous ramène à en étudier la faisabilité. On se retrouve alors avec les contraintes énoncées au § précédent comme résumé Figure VI-6.

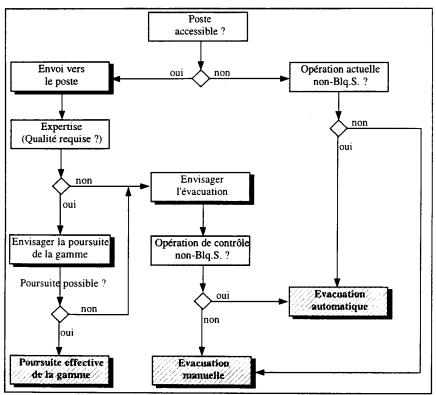


Figure VI-6: Décisions à prendre pour un produit susceptible d'être affecté par une défaillance

Le choix d'envoyer la pièce vers un poste de litige nécessite non seulement l'existence de ces postes de contrôle au niveau de la partie opérative, mais aussi que de tels postes soient accessibles à partir de l'emplacement où se trouve la pièce (cf. Figure VI-7). Nous soulignons ainsi l'intérêt de les avoir pris en compte au niveau des opérations de contrôle (cf. chapitre II §3.3.3.3) du GAO. Nous saurons en effet si ces opérations sont accessibles pour une pièce donnée et si elles sont de plus non-Blq.S., ce qui signifie qu'il sera ensuite possible d'évacuer automatiquement le produit du SFPM.

2.2 Réduire l'indisponibilité du SFPM

Il s'agit de trouver un fonctionnement du SFPM utilisant au mieux les fonctionnalités restantes de l'installation, compte tenu des objectifs de production. Concernant les produits, les décisions prises à ce niveau considèrent les pièces brutes qui seront mises en entrée du SFPM. La réduction de l'indisponibilité est obtenue en choisissant une configuration et un type de production permettant au SFPM de produire. De façon à corréler les impératifs liés

- produits et ceux liés à l'engagement des ressources, deux cas sont successivement envisagés :
 - Finir une partie de la production en cours ;
 - Changer de type de production.

Pour l'un ou l'autre des cas, une configuration de l'architecture de production, comportant les ressources et les commandes à mettre en oeuvre, est fournie par le recouvrement.

2.2.1 Finir une partie de la production en cours

Cette option considère que la mission SFPM consiste à produire des lots de pièces données. L'objectif est de tout mettre en oeuvre afin de terminer le maximum de lots. Les flexibilités de l'architecture sont étudiées afin de savoir si, malgré la panne, le SFPM est toujours en mesure d'assurer les productions actuelles à partir de pièces brutes, mises en entrée. Puis, le recouvrement s'intéresse à déterminer une nouvelle configuration permettant de fabriquer ces produits.

La détermination de la nouvelle architecture est elle-même orientée par une stratégie système. Tant qu'une solution ne peut être trouvée, le recouvrement considère une portion variable de l'architecture vue comme un ensemble de potentialités, allant de l'ensemble des redondances actives à l'ensemble des redondances totales utilisables (actives + passives), qui correspondent respectivement à la prise en compte des flexibilités selon les ensembles et de la Figure VI-2. L'intérêt est de commencer par étudier les potentialités dont l'utilisation nécessitera un minimum de réorganisations au niveau de la commande et de l'architecture, puis de progressivement s'intéresser à celles qui nécessitent plus de mise en oeuvre.

Le recouvrement détermine donc si le SFPM peut continuer les productions en cours avec sa configuration actuelle, ou si la configuration doit être changée. Il précise dans ce cas quelle est cette nouvelle configuration.

Exemple: Considérons le SFPM représenté par son GAO Figure VI-7. Nous supposons que, pour fabriquer les produits requis, l'ordonnancement retient les séquences d'opérations suivantes : s1=(2, 6, 10), s2=(3, 6, 11) et s3=(4, 7, 12). Il laisse donc certains indéterminismes qui sont résolus par le pilotage. Nous constatons que R3 ainsi que les opérations n°8 et 9, réalisées par R2, ne sont pas sollicités. Après défaillance, les possibilités suivantes seront successivement étudiées :

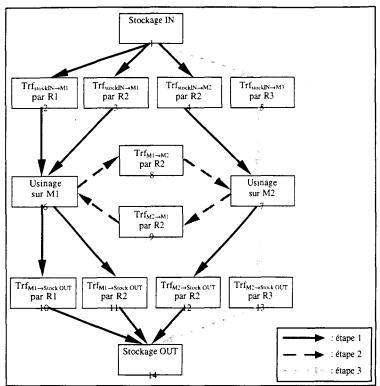


Figure VI-7: Prise en compte progressive des potentialités de l'architecture

- 1. Une première étape consiste à rechercher de nouvelles séquences d'opérations en utilisant l'ensemble des opérations n°2, 3, 4, 6, 7, 10, 11, et 12 (restreint aux opérations non-défaillantes). Cet ensemble contient les opérations effectivement retenues par l'ordonnancement. En cas de succès, le recouvrement a juste à demander un nouveau paramétrage de la commande par le pilotage (reconfiguration de type 1);
- 2. Une deuxième étape consiste à rechercher de nouvelles séquences d'opérations en utilisant l'ensemble des opérations n°2, 3, 4, 6, 7, 8, 9, 10, 11, et 12 (restreint aux opérations non-défaillantes). Cet ensemble contient en plus du précédent les opérations réalisées par des ressources en mode d'exploitation {Au repos}, mais qui ne sont pas en mode d'arrêt {Hors-tension}. En cas de succès, le recouvrement reconfigure la commande selon les mécanismes du §1.3 (reconfiguration de type 2);
- 3. Une troisième étape consiste à rechercher de nouvelles séquences d'opérations en utilisant l'ensemble des opérations n°2, 3, 4, 5, 6, 7, 8, 9, 10, 11, 12, et 13 (restreint aux opérations non-défaillantes). Cet ensemble contient en plus les opérations réalisées par des ressources en mode d'arrêt {Hors-tension}. Le recouvrement reconfigure l'architecture et fait appel à la gestion des modes afin de remettre en marche R3 (reconfiguration de type 3).

Remarque: La nouvelle configuration peut faire intervenir des ressources défaillantes lorsque la panne n'altère pas une partie des opérations réalisées par la ressource. Dans ce cas,

la ressource est mise en mode dégradé fonctionnel et ne peut être immédiatement réparée. Une maintenance curative est planifiée et interviendra en fin de production.

2.2.2 Changer de type de production

Cette option est choisie quand il n'est plus possible de continuer au moins une des productions en cours, et que le temps de réparation estimé est très long. L'engagement du système est alors privilégié.

Le recouvrement interroge la planification / ordonnancement afin d'obtenir les productions prévues. Après choix d'une nouvelle production, le recouvrement considère directement l'ensemble maximal des potentialités, sans faire intervenir les ressources en panne, même si elles peuvent toujours réaliser une opération. En effet, le choix d'une nouvelle production n'est décidé que pour permettre d'utiliser le SFPM pendant la réparation des ressources en panne. Une fois qu'une production réalisable est choisie, le recouvrement détermine la nouvelle configuration du SFPM. Les affectations sont gérées en-ligne par le pilotage. Parallèlement, un nouvel ordonnancement, sur la base de cette production, est calculé. Le temps de calcul étant souvent long, il est décidé de fabriquer quand même pendant l'élaboration de l'ordonnancement, même si cette solution intermédiaire n'est pas optimale (cf. Figure VI-8).

Ensuite, une nouvelle configuration, résultat des calculs de l'ordonnancement, est mise en oeuvre jusqu'à réparation des ressources en panne. Cette option nécessite de connaître le nombre de pièces qui seront produites pendant le temps alloué pour le calcul du nouvel ordonnancement (T_{ordo}). Ce rôle de suivi prévisionnel est attribué au recouvrement (cf. section suivante).

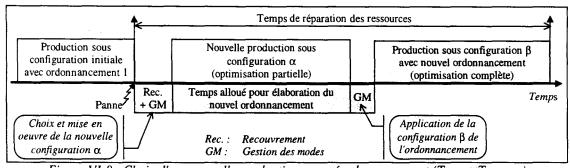


Figure VI-8: Choix d'une nouvelle production avec réordonnancement ($T_{ordo} \ll T_{réparation}$)

2.3 Synthèse : enchaînement des stratégies

Nous résumons les stratégies ci-dessus en présentant la façon dont elles sont amenées à s'enchaîner (cf. Figure VI-9). Le choix d'une option dépend de cet enchaînement, de la panne (impact sur le SFPM et durée de l'état défaillant), et des potentialités du SFPM.

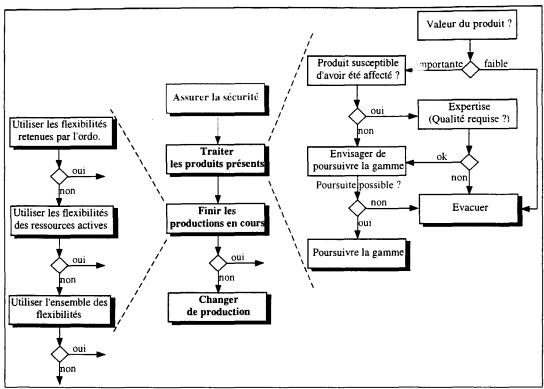


Figure VI-9 : Stratégies de recouvrement

Après avoir demandé la mise dans un état permettant d'assurer la sécurité, le recouvrement s'intéresse aux produits présents dans le SFPM. Suivant des impératifs liés principalement à la valeur des produits (prix de la matière première et coût des usinages), il est envisagé soit de tout évacuer, soit de n'évacuer que les produits susceptibles d'avoir été affectés par la panne, soit de contrôler si les produits affectés ont toujours la qualité souhaitée. Pour les produits semi-finis jugés acceptables, il est envisagé de poursuivre la gamme. Cette option, si elle est réalisable, nécessite de choisir une configuration du SFPM (le principe similaire à celui détaillé pour les pièces brutes mises en entrée du SFPM). Dans le cas contraire, les produits sont quand même évacués. La phase, consistant à vider l'architecture des produits présents, correspond à un régime transitoire.

Le recouvrement s'intéresse également aux pièces brutes mises en entrée du SFPM. Il envisage en premier lieu de poursuivre le maximum de types de productions qui étaient assurés avant la panne. Pour cela, les priorités sont d'étudier :

- si les flexibilités actuellement retenues par l'ordonnancement suffisent pour réaliser les productions;
- si une reconfiguration de type 2, consistant à modifier la commande de certaines ressources et à en arrêter d'autres, est nécessaire ;

• si une nouvelle configuration de l'architecture doit être trouvée en utilisant l'ensemble des flexibilités disponibles, ce qui oblige à remettre en marche des ressources.

Ces priorités visent à utiliser le plus tardivement possible les redondances passives, dont la mise en oeuvre nécessite la mise en tension et la préparation des ressources concernées. En cas d'échec, le recouvrement envisage d'autres types de production afin d'éviter un arrêt total du SFPM pendant la réparation. L'impératif est alors lié à la disponibilité générale du système.

Remarque: Il convient de nuancer l'enchainement séquenciel des stratégies visant à traiter les produits présents et à finir les productions en cours de la Figure VI-9. La recherche d'une configuration pour traiter les produits présents et la recherche d'une configuration pour finir les productions en cours peuvent être menées en parallèle. En revanche, si les configurations déterminées diffèrent trop, l'application se fera séquenciellement.

3. Proposition d'une structuration de la fonction de recherche d'une configuration du recouvrement

Nous nous intéressons dans cette section à préciser comment le recouvrement recherche et calcule une nouvelle configuration après occurrence d'une panne. Parmi les stratégies évoquées, nous considérons principalement celles consistant à réduire le temps d'indisponibilité du SFPM (§2.3 de ce chapitre). Le traitement des produits présents utilise des fonctions similaires qui ne sont pas précisément détaillées dans le mémoire.

Le classement des types de reconfiguration (cf. §1.5 de ce chapitre) permet de trouver des facteurs communs concernant les décisions à élaborer. Grâce à ces facteurs, nous pouvons décomposer l'activité de recherche de configuration selon plusieurs fonctions élémentaires, que le recouvrement enchaîne afin de choisir une configuration en accord avec les stratégies énoncées.

3.1 Présentation générale

La Figure VI-10 détaille les procédures à mettre en oeuvre, afin de répondre aux objectifs résumés dans les blocs *finir les productions en cours* et *changer de production* de la Figure VI-9. Les fonctions à enchaîner sont décrites par la suite.

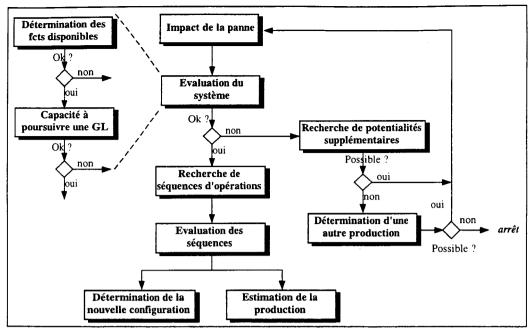


Figure VI-10 : Procédure de recherche de configuration

Dans notre approche, les décisions du recouvrement se fondent sur un système d'information (cf. chapitre II §3). Le modèle GAO est élaboré afin de répondre à ces exigences. Les fonctions élémentaires définies utilisent donc le GAO comme source d'information. Nous précisons pour chacune d'elles les informations qu'elles requièrent.

3.2 Détail des fonctions

3.2.1 Impact de la panne

Comme nous l'avons déjà cité lors du choix d'une stratégie, l'impact de la panne sur le SFPM est une étape incontournable. Le but de cette fonction est de déterminer les restrictions imposées par la panne sur une architecture de production. Cette fonction reçoit en entrée une architecture de production (c'est-à-dire son GAO constitué des ensembles Σ_{op1} , Σ_{N1} , et Σ_{A1} présentés au chapitre IV §1.3) et les opérations {hors-service}. Elle fournit un sous-GAO (Σ_{op2} , Σ_{N2} , et Σ_{A2}), modélisant le système.

Le principe est similaire à celui présenté au chapitre V §2.2 lors de la détermination des opérations critiques. La répercussion de chaque opération {hors-service} est d'abord traduite au niveau des noeuds (chapitre V §2.2.1). Puis, un calcul d'accessibilité détermine les opérations non-Acc.E. ou Blq.S. Le nouveau GAO est constitué des opérations de Σ_{op1} auxquelles sont retranchées les opérations {hors-service}, non-Acc.E. ou Blq.S. Σ_{op2} , Σ_{N2} , et Σ_{A2} sont donc des sous-ensembles de Σ_{op1} , Σ_{N1} , et Σ_{A1} .

3.2.2 Evaluation du système

La question est de savoir si le système peut délivrer certaines fonctions de transformation, puis s'il peut assurer une production donnée. Cette activité est décomposée en deux phases : vérifier que les fonctions composant la GL sont disponibles, et vérifier que le SFPM peut effectivement réaliser la GL. Les fonctions suivantes reçoivent en entrée une architecture de production modélisée par son GAO, et une liste ordonnée de fonctions correspondant à une GL.

3.2.2.1 Détermination des fonctions de transformation délivrées

La détermination des fonctions de transformation effectivement délivrées par la configuration du SFPM est une condition sine qua non de la capacité du SFPM à assurer une production. Elle se fonde sur l'ensemble Σ_{op2} du GAO. Comme il a été présenté au chapitre II §3.3.3.2, une fonction est vue comme un ensemble d'opérations. Ainsi, l'application de la fonction de classification Cl_f à l'ensemble Σ_{op2} , permet de déterminer les ensembles F_j non-vides, qui correspondent aux fonctions effectivement délivrées par le SFPM. Les fonctions de transformation s'en déduisent immédiatement.

Selon le résultat, cette étape permet de savoir s'il faut rechercher d'autres opérations équivalentes afin de permettre au SFPM d'assurer la GL désirée, ou passer à la seconde phase d'évaluation.

3.2.2.2 Capacité à poursuivre une gamme

Cette fonction s'intéresse à savoir si le SFPM peut effectivement produire un type de pièce donné. Il faut en effet remarquer que le SFPM peut délivrer un ensemble de fonctions de transformation sans pour autant pouvoir les enchaîner dans un ordre précis. Le but est de rechercher l'existence d'une séquence d'opérations mettant en oeuvre de façon ordonnée les fonctions de la GL. Comme pour la fonction précédente, un résultat négatif implique de solliciter une recherche de potentialités supplémentaires.

3.2.3 Recherche de potentialités supplémentaires

Cette fonction intervient lorsque le résultat d'une des fonctions d'évaluation du système est négatif. Elle fait partie d'une boucle dans laquelle le recouvrement étudie la possibilité de redistribuer les tâches de transformation, nécessaires à une production, affectées par la panne, à des opérations de transformation équivalentes non défaillantes.

La fonction recherche si, dans le GAO qui lui est fourni, l'ensemble des potentialités de l'architecture a été pris en compte. En cas de réponse négative, elle demande de considérer un nombre plus important d'opérations.

3.2.4 Détermination d'une autre production

Cette fonction intervient lorsque la panne ne permet pas de poursuivre les productions en ours, même en prenant en compte la totalité des potentialités du SFPM, et que le système possède toujours des fonctions de transformation disponibles. Elle reçoit de la planification les productions prévues, sous forme de GL, par ordre croissant de date de mise en fabrication. Pour chaque type de produit, on vérifie que les fonctions de la GL appartiennent à l'ensemble des fonctions disponibles (fournies par la première fonction d'évaluation du système). Puis, la capacité à poursuivre cette GL est étudiée par la seconde fonction d'évaluation du système. Chaque production est étudiée jusqu'à en trouver une qui convienne.

3.2.5 Recherche de séquences d'opérations réalisant une gamme

Une fois l'existence prouvée, cette fonction détermine explicitement l'ensemble des séquences d'opérations permettant de réaliser une GL. L'objet revient à rechercher, dans le GAO, des chemins d'un point d'entrée à la sortie passant successivement par des noeuds de transformation particuliers. Le traitement équivaut à une recherche de chemins sous contrainte dans un graphe. Il sera détaillé au chapitre VII §3.3.

3.2.6 Evaluation des séquences

A partir de l'espace de solutions fourni par la fonction précédente, la fonction d'évaluation des séquences va déterminer, pour chaque GL, les meilleures séquences, compte tenu de critères précis. Cette fonction est délicate. Il ne s'agit pas en effet de refaire un ordonnancement.

Des heuristiques doivent être proposées dans le but de réduire les alternatives et de guider les choix, mais elles ne constituent pas une preuve d'optimalité. Elles ont cependant l'avantage d'exploiter une information spécifique. Nous proposons deux critères. Lorsque des pièces différentes sont produites simultanément, la distance des nouvelles séquences par rapport à celles initiales peut être étudiée. Le but est de minimiser les modifications de l'ordonnancement initial, qui s'est déjà intéressé à la disponibilité temporelle des ressources. Si ce n'est pas possible (car il y a trop de modifications au niveau de l'architecture), pour une production, la séquence permettant de réaliser la GL en un temps minimum est choisie.

Ces évaluations plutôt grossières, fondée sur un nombre restreint de critères, vont fournir des séquences d'opérations et des ratios utilisables par le pilotage. Par exemple, si deux ressources de transformation produisaient un même type de pièces et, qu'après la panne, une seule reste disponible, alors le ratio de pièces en entrée sera divisé par deux.

3.2.7 Détermination de la nouvelle configuration

A partir des séquences d'opérations, cette fonction détermine les ressources à mettre en mode d'exploitation {Production}. Ces ressources sont listées à l'aide de la caractéristique "support de réalisation" des opérations concernées (cf. fonction de classification Cl_R du chapitre II §3.3.3.2). Ces séquences d'opérations permettent aussi d'activer les GO correspondantes du module de coordination de la commande selon les principes de reconfiguration de la commande présentés au §1.4.3 de ce chapitre.

3.2.8 Estimation de la production sous la nouvelle configuration

Cette fonction estime le nombre de pièces produites sur une période donnée. Cette donnée est transmise à la gestion de production. Elle est très utile dans le cas d'un réordonnancement. En effet, pour l'élaboration de l'ordonnancement, il est nécessaire de connaître le nombre de pièces restant à produire au moment de la production sous ce nouvel ordonnancement. Puisque l'on choisit de produire pendant une durée supérieure ou égale au temps de calcul de l'ordonnancement, le nombre de pièces produites jusqu'à la commutation (donnée fixée au départ) doit être estimé. La donnée fournie n'est qu'une estimation avant production. Pendant la production, le suivi du flux des pièces est réalisé par la surveillance prédictive [LY 98].

3.3 Exemples de réactions

Nous donnons quelques exemples de réaction calculés par le recouvrement, en fonction de l'ampleur et de la durée de la panne. Le premier exemple illustre la recherche progressive d'une configuration en utilisant les potentialités de l'architecture. Le second exemple illustre des décisions qui sont principalement prises au niveau de la fonction d'évaluation des séquences.

3.3.1 Recherche progressive de potentialités

Cet exemple précise différents cas de réaction possibles en fonction de l'impact de la panne sur l'architecture. Considérons le SFPM, constitué de 5 robots de transfert (notés de R11 à R15) et de 2 ressources de transformation (notée M1 et M2), et son GAO Figure VI-11. Les fonctions de transformation notées f_1 et f_2 sont délivrées par M1; f_3 et f_4 sont délivrées par M2. Les fonctions de transfert sont notées de f_{10} à f_{15} (f_{10} = transfert de IN à M1, f_{11} = transfert de IN à M2, f_{12} = transfert de M1 à M2, ...). Le SFPM doit produire des pièces de GL f_1, f_3 . La configuration initiale est :

• R11, R13, R14, M1, M2 en mode de marche {Automatique}, en mode d'exploitation {Production};

- R12 en mode de marche {Automatique}, en mode d'exploitation {Au repos};
- R15 en mode d'arrêt {Hors-tension}, en mode d'exploitation {Au repos}.

Le GAO initial est donc composé des 10 noeuds, mais le noeud 2 ne contient que $Op_{R11-f10}$. Le noeud 3 ne contient que $Op_{R11-f11}$. Le noeud 8 ne contient que $Op_{R14-f14}$. Le noeud 9 ne contient que $Op_{R14-f15}$. Les cas suivants sont envisagés :

- 1. R11 tombe en panne. La fonction d'analyse d'impact de la panne fournit un graphe résultant vide (toutes les opérations sont non-Acc.E. ou Blq.S.). Aucune fonction de la GL n'est disponible. La fonction de recherche de potentialités supplémentaire demande d'intégrer les opérations réalisées par R12. Cette fois, les fonctions de la GL sont disponibles. Le SFPM est reconnu capable d'assurer la GL. Une seule séquence d'opérations est déterminée : (Op_{R12-f10}, Op_{M1-f1}, Op_{R13-f12}, Op_{M2-f3}, Op_{R14-f115}). Le recouvrement demande le passage de R12 en mode d'exploitation {Production} et la mise à l'arrêt de R11 pour réparation. Il s'agit d'une reconfiguration de type 2 ;
- 2. R14 tombe en panne. Le graphe résultant est ici aussi vide. La fonction de recherche de potentialités supplémentaires examine les opérations appartenant aux noeuds 8 et 9. Elle demande alors d'intégrer les opérations réalisées par R15. Cette fois, le SFPM peut assurer la GL. Deux séquences d'opérations sont déterminées : (Op_{R11-f10}, Op_{M1-f1}, Op_{R13-f12}, Op_{M2-f3}, Op_{R15-f15}) et (Op_{R12-f10}, Op_{M1-f1}, Op_{R13-f12}, Op_{M2-f3}, Op_{R15-f15}). Quelle que soit la séquence choisie, le recouvrement demande la mise en tension de R15, et son passage en mode d'exploitation {Production}, nécessitant une phase de préparation. La reconfiguration est de type 3;
- 3. R13 tombe en panne. Le graphe résultant ne contient plus les opérations des noeuds 6 et 7. Les fonctions de la GL sont toujours disponibles. Mais le SFPM n'est plus en mesure de les enchaîner. La prise en compte successive des opérations réalisées par R12 et par R15 ne change rien. La fonction de détermination d'une nouvelle configuration se met en rapport avec la planification et choisit comme nouvelle production la GL={f₂}. Quatre séquences d'opérations sont déterminées : (Op_{R11-f10}, Op_{M1-f2}, Op_{R14-f14}), (Op_{R12-f10}, Op_{M1-f2}, Op_{R15-f14}), et (Op_{R12-f10}, Op_{M1-f2}, Op_{R15-f14}). Parmi ces séquences, le choix va se fixer sur la première qui ne met pas en fonctionnement de ressources initialment à l'arrêt.

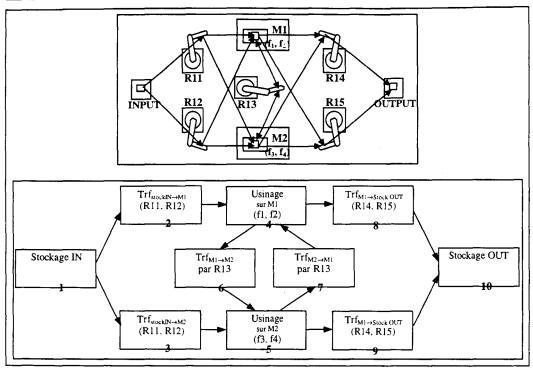


Figure VI-11: Exemple d'architecture

3.3.2 Décisions de type gestion de production

Cet exemple précise certaines orientations prises par le recouvrement une fois que la capacité à poursuivre la production a été analysée. Nous supposons que l'ordonnancement calculé est cyclique [CAM 97], [KOR 98], comme c'est le cas des heuristiques proposées par l'équipe PFM gestion de production. Sur un cycle de durée T_{c1} , le SFPM est supposé produire 2 pièces de type A, 3 pièces de type B et 1 pièce de type C. La totalité de la production est réalisée en 100 cycles. L'application de l'ordonnancement est réalisée en donnant les dates d'entrée des pièces et en fournissant des ratios au pilotage. Après la panne (survenue au bout de 20 cycles), plusieurs cas sont envisagés :

- 1. Le SFPM peut encore fabriquer toutes les pièces. La durée de réparation est jugée courte. Il est prévu de suivre un horizon de production cyclique. Les séquences sont choisies afin de "coller" le plus possible à l'ordonnancement initial. Le recouvrement impose au pilotage de suivre des ratios identiques à ceux de départ (2A, 3B, 1C). Le nouveau temps de cycle T_{c2} est plus grand que T_{c1}. La production de certaines pièces est en effet plus lente car elle n'utilise plus de séquences optimales. Dès que les ressources en panne sont réparées, la production reprend sur la base de l'ordonnancement :
- Le SFPM peut encore fabriquer toutes les pièces. La durée de réparation est estimée beaucoup plus longue que le temps T_{ordo} alloué pour le calcul d'un nouvel ordonnancement (par exemple 2 heures). Comme précédemment, on choisit de

produire avec des ratios identiques sur un temps de cycle T_{c2} ($T_{c2} > T_{c1}$). T_{c2} est fourni par la fonction d'estimation de la production du recouvrement. On souhaite avoir un temps de cycle meilleur. Pour cela un nouvel ordonnancement est élaboré pendant T_{ordo} . Le calcul se base sur le nombre de pièces restant effectivement à produire (donnée fournie par la fonction d'estimation de la production). Si le temps de cycle est meilleur que T_{c2} , on enchaîne, à $20 \times T_{c1} + T_{ordo}$, sur une production gérée par le nouvel ordonnancement ;

- 3. Le SFPM ne peut plus fabriquer de pièces de type A. On choisit de produire 3B et 1C pendant la réparation. Si le temps de réparation est long, un nouvel ordonnancement est élaboré (cf. cas précédent);
- 4. Le SFPM n'est plus en mesure de produire les pièces A, B et C. La planification est informée. Elle transmet une nouvelle production D à la fonction de détermination d'une autre production. Or les fonctions disponibles par le SFPM ne permettent pas de réaliser D. Une autre production est demandée. Pour celle-ci (E), les fonctions de transformation conviennent. La fonction d'évaluation de la capacité à poursuivre une gamme donne son accord. Parmi les séquences possibles une est choisie, ce qui permet de déterminer une nouvelle configuration dans laquelle le SFPM continue à produire pendant que les ressources en panne sont réparées.

Conclusion: L'analyse des stratégies, sur lesquelles se fondent les décisions du recouvrement, nous a permis de définir des fonctions élémentaires dont l'enchaînement aboutit à déterminer la nouvelle configuration du SFPM. Des exemples illustrent l'utilisation de ces fonctions, dans le cas d'une recherche de configuration visant à poursuivre une production donnée, à partir de pièces brutes. En d'autres termes, les fonctions d'évaluation du système et de détermination des séquences considèrent uniquement des pièces mises en entrée du SFPM. Le cas consistant à trouver la configuration pour un produit présent dans l'architecture est similaire, mise à part que ces fonctions considèrent le noeud du GAO où se trouve la pièce semi-finie et non plus le noeud d'entrée du GAO.

Les fonctions ont été présentées selon une approche système. Une bonne partie nécessite l'utilisation du GAO, aussi bien comme source d'information que pour certains calculs comme la recherche de chemins. Le détail de leurs mécanismes fait l'objet du chapitre suivant.

<u>Chapitre VII:</u>

Procédure

de

recherche de configuration

Ce chapitre présente les mécanismes utilisés dans la procédure de recherche de configuration du recouvrement. Cette dernière est structurée selon la Figure VI-10. Elle se compose des fonctions d'impact de la panne, d'évaluation du système, de recherche de potentialités supplémentaires, de détermination d'une autre production, de recherche de séquences d'opérations, d'évaluation des séquences (cf. Figure VI-10, p 176).

Certaines de ces fonctions sont maintenant détaillées. Les calculs se fondent sur une architecture modélisée par GAO. Ce modèle sert de système d'information. Les traitements, ajoutés au modèle afin de simplifier la mise en oeuvre des fonctions élémentaires de la procédure, sont explicités.

Bien que ce chapitre s'intéresse principalement à la recherche d'une nouvelle configuration, afin de réduire l'indisponibilité du SFPM quelques références sont faites à des extensions de la procédure, lui permettant de traiter les produits présents dans l'architecture.

1. Analyse des besoins de la procédure de recherche de configuration

La procédure de recherche de configuration se fonde sur une connaissance des potentialités du SFPM et de l'état de ce dernier au moment de la défaillance. Elle reçoit en entrée la nature de la panne, la durée estimée de réparation et les types de production, c'est-à-dire leurs GL. Elle détermine la nouvelle configuration, c'est-à-dire les ressources à mettre en marche, à arrêter, à mettre en mode d'exploitation {Production}, et les programmes de commande à activer. Comme énoncé au chapitre IV, le modèle GAO de l'architecture permet d'obtenir la connaissance de ces potentialités. Nous avons présenté, au chapitre VI §3.2.7, comment la nouvelle configuration peut se déduire des séquences d'opérations retenues pour produire différents types de pièces.

En appliquant le principe de recherche progressive du point de vue du GAO, nous en déduisons les nouvelles contraintes requises sur le modèle, ce qui nous permet de l'enrichir.

1.1 Implication du principe de recherche progressive

Le principe se fonde sur les trois types de reconfigurations définis au chapitre VI §1.5 et sur une priorité accordée aux productions en cours. Selon l'impact de la panne, le recouvrement étudie successivement si :

- 1. une reconfiguration de type 1 permet de poursuivre les GL en cours. On produit avec des dégradations de performance par rapport à ce qui était proposé par l'ordonnancement, mais on évite le calcul d'une nouvelle configuration et d'un nouvel ordonnancement. Ceci est intéressant lorsqu'il reste peu de pièces à fabriquer pour finir la production. Ce peut aussi être une production transitoire avant le résultat du calcul d'un nouvel ordonnancement :
- 2. une reconfiguration de type 2 permet de poursuivre les GL en cours. Les ressources en attente sont maintenant prises en compte ;
- 3. une reconfiguration de type 3 permet de poursuivre les GL en cours. L'ensemble des flexibilités du SFPM (redondances actives et passives) est considéré.

Remarque: Si l'arrêt de la ressource est dû à une maintenance systématique prévue mais qui n'est pas encore commencée, l'utilisation de la ressource est encore envisageable. Le cas consistant à différer la maintenance systématique est souvent rencontré en entreprise lorsque des impératifs de production priment.

Une dernière option, avant l'arrêt complet du système, pour cause d'impossibilité de continuer une quelconque production, consiste à considérer l'ensemble des flexibilités du SFPM (redondances actives et passives), sans les ressources à réparer et à choisir une autre production réalisable par le système.

Le choix dépend du résultat de la fonction d'évaluation, elle-même alimentée par celui de la fonction d'impact de la panne. Tant que le résultat est négatif, un niveau i+1 de réaction est étudié. Comme évoqué au chapitre VI §3.2.1, la fonction d'impact reçoit en entrée un GAO, et la panne. Les données variables mises en entrée de cette fonction sont donc un GAO constitué (Figure VII-1):

- étape 1 : des opérations retenues par l'ordonnancement ;
- étape 2 : des opérations de l'étape 1 et des opérations réalisées par des ressources en attente ;
- étape 3 : des opérations de l'étape 2 auxquelles sont ajoutées les opérations réalisées par des ressources à l'arrêt ;
- étape 4 : des opérations de l'étape 3 sauf celles réalisées par une ressource en mode de fonctionnement {Dégradé} et d'une autre GL.

Remarque: Avant de passer de l'étape 1 à l'étape 2, la fonction de détermination de potentialités supplémentaires peut vérifier qu'il n'existe pas de redondance "évidentes" au niveau des noeuds de transfert du GAO. Elle examine si les noeuds contenant une opération retenue par l'ordonnancement et devenue {hors-service} ne comportent pas d'opérations équivalentes. En cas de réponse favorable, ces opérations sont à considérer en priorité. Dans la suite, nous supposerons que les pannes n'affectent pas d'opérations présentant de telles caractéristiques de redondances.

La connaissance des opérations réalisées par des ressources dans un mode particulier est donc un prérequis pour l'application du principe de recherche progressive. La détermination des différents ensembles de la Figure VII-1 sera plus aisée si certains modes des ressources sont répercutés au niveau des opérations du GAO. Il s'agit donc d'étudier la mise à jour du GAO par la gestion des modes.

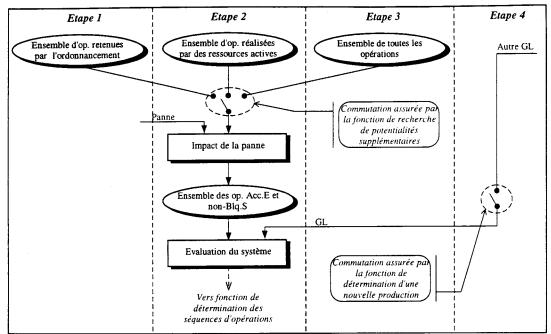


Figure VII-1: Recherche progressive de potentialités

1.2 Contraintes impliquant des données supplémentaires à intégrer au modèle GAO

D'autres exigences concernent la connaissance directe de l'état du système et les contraintes imposées par la fonction d'évaluation, plus complexe que celle déjà définie pour la tolérance.

1.2.1 Connaissance de l'état du SFPM

Comme précisé précédemment, l'état concerne à la fois les opérations et les pièces. Il s'agit de traduire, au niveau des opérations du GAO, une panne détectée et diagnostiquée. Il faut préciser comment est réalisée la mise à jour du GAO par la surveillance, considérée comme un système informationnel.

Si l'on s'intéresse au traitement des produits présents dans le SFPM, le GAO doit aussi permettre de représenter, à un instant, la position du produit dans l'architecture, s'il demande une opération, s'il est en train d'être transféré, usiné, ... par une opération. Nous verrons que ceci nécessite d'avoir un lien avec la commande. Grâce à cette connaissance, il sera possible de savoir si la pièce est susceptible d'avoir été physiquement affectée par la panne.

1.2.2 Evolutions requises par la fonction d'évaluation

L'évaluation du SFPM est réalisée en deux phases (cf. chapitre VI §3.2.2). La disponibilité des fonctions de transformation d'une GL est tout d'abord analysée. Les traitements sont identiques à ceux décrits dans le chapitre V §2, relatif à l'évaluation de la tolérance. Concernant l'étude de la disponibilité de la fonction de transformation f_i , ils consistent principalement à rechercher l'existence d'au moins un chemin du point d'entrée au point de

CHAPITRE VII: Procédure de recherche de configuration

sortie en passant par un noeud de transformation comportant une opération mettant en oeuvre f_i. Pour cela les caractéristiques Acc.E. et Blq.S. ont été introduites.

La deuxième phase correspond à la possibilité de réaliser une GL, c'est-à-dire à la possibilité d'enchaîner les fonctions de transformation constituant la GL. Ceci équivaut à une recherche de chemins passant successivement par des noeuds mettant en oeuvre les fonctions f_1, \ldots, f_n composant la GL. Pour un noeud mettant en oeuvre f_i , il faut donc savoir s'il est accessible à partir d'un noeud mettant en oeuvre f_{i-1} . L'extension de la caractéristique d'accessibilité va s'avérer d'un grand intérêt.

Ces considérations nous amènent à enrichir le modèle, comme présenté dans les sections suivantes.

2. Enrichissement du modèle

Afin de répondre aux nouvelles exigences de la section précédente, nous étudions comment le GAO est renseigné par la surveillance, la commande et comment il s'interface avec la gestion des modes. Des caractéristiques complémentaires sont ajoutées afin de faciliter les traitements.

2.1 Interactions du modèle avec le système de surveillance

Ici sont précisées les interactions du GAO avec la détection et le diagnostic, qui basent leurs calculs sur d'autres modèles. Par exemple, un modèle fonctionnel utilisé par le diagnostic fournit des informations sur l'état d'une ressource qui sont elles-mêmes intégrées au niveau de certaines caractéristiques des opérations.

2.1.1 Ajout de caractéristiques aux entités du modèle

Afin de répondre aux besoins énoncés (§1.2.1 de ce chapitre), des caractéristiques associées aux opérations sont ajoutées ou précisées.

2.1.1.1 Prise en compte de l'état des opérations

Pour les opérations, cette prise en compte est réalisée grâce à la caractéristique "état", qui a été définie au chapitre IV §3.1.2. Cette caractéristique est dynamique et prend comme valeur {normal} ou {hors-service} (cf. Figure VII-2). Un changement dans la valeur de la caractéristique "état" d'une opération est un événement conditionnant le lancement de la procédure du recouvrement qui déterminera la nouvelle configuration du SFPM.

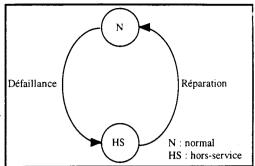


Figure VII-2 : Changement de la caractéristique état d'une opération en cas de défaillance complète

Une autre caractéristique "durée opératoire" rend indirectement compte de l'état de l'opération. Elle indique le temps mis par la ressource pour réaliser l'opération. Cette durée peut être définie comme la différence entre l'instant d'envoi de la commande de début d'opération et l'accusé de réception de fin d'opération. Elle est considérée d'un point de vue théorique (caractéristique statique). Elle peut aussi être interprétée d'un point de vue effectif (caractéristique dynamique) de façon à prendre en compte les variations dues à une dégradation temporelle de l'opération. Elle est renseignée par le module de maintenance prédictive, via la surveillance.

Cette caractéristique est utilisée par la fonction d'évaluation des séquences, dans la phase du calcul du temps mis par le SFPM pour réaliser une séquence particulière. Ce temps est la somme des durées opératoires des opérations constituant la séquence.

2.1.1.2 Prise en compte de l'état des pièces dans le SFPM

La prise en compte des produits au niveau du GAO sert principalement à déterminer si les produits présents dans le SFPM sont susceptibles d'avoir été affectés par la panne. Lorsqu'une opération devient défaillante, tous les produits sur lesquels la fonction est mise en oeuvre par l'opération sont considérés comme susceptibles d'avoir été affectés.

Les caractéristiques définies à ce sujet sont "pièces sollicitant l'opération", "pièce en transfert / usinage / assemblage / stockage", et "pièces transférées / usinées / assemblées / stockées ". Ces caractéristiques sont dynamiques.

La caractéristique "pièces sollicitant l'opération" donne la liste des pièces qui sont en attente de la réalisation de l'opération. La caractéristique "pièce en usinage" indique la pièce qui est en train d'être usinée au niveau de l'opération en question. Il en va de même pour les caractéristiques "pièce en transfert", "pièce en assemblage" et "pièce en stockage". La caractéristique "pièces usinées" donne la liste des pièces qui viennent d'être usinées par l'opération d'usinage concernée (idem pour "pièces transférées", "pièces assemblées", et "pièces stockées").

2.1.2 Principe de mise à jour de ces caractéristiques par les deux types de surveillance

Nous présentons maintenant comment les caractéristiques précédentes sont mises à jour en fonction d'informations provenant d'autres modèles de la surveillance. Tel qu'il est construit et de part les éléments informations qu'il modélise, le modèle GAO présente l'intérêt de s'interfacer aisément avec les deux types de surveillances développés au LAIL, qui sont complémentaires (chapitre I §3.2.2.5). Nous supposons qu'une surveillance, directe [ELK 95] ou indirecte [TOG 96/b], est effectuée pour chaque opération du GAO. Pour une opération de transfert, le principe de mise à jour est le suivant [BER 97/a]:

- Lorsqu'une pièce sollicite l'opération et que l'ordre d'effectuer l'opération est envoyé par la coordination de la commande au graphe de commande, la pièce sollicitant l'opération est retirée de la liste de la caractéristique "pièces sollicitant l'opération" et est mise dans la caractéristique "pièce en transfert" de l'opération;
- Si l'on est assuré de la réalisation de la commande, la pièce est retirée de la caractéristique "pièce en transfert" et est mise dans la caractéristique "pièces transférées";
- Sinon (compte rendu intempestif ou non reçu), la caractéristique "état" de l'opération est mise à {hors-service}. Une procédure de diagnostic (sur le graphe fonctionnel de la machine intervenant dans l'opération) est peut être lancée. Elle permet de déterminer si les caractéristiques "état" d'autres opérations sont elles-aussi {hors-service}.

Nous illustrons maintenant ce principe en considérant le cas d'une opération de transfert, sur laquelle est appliquée une surveillance indirecte. Comme il a été présenté au chapitre I §3.2.2.5 (cf. Figure I-26), une fenêtre temporelle définit la limite de validité du compte rendu Cri, associé à l'opération surveillée. Dans l'exemple, nous considérons que deux pièces P1 et P2 demandent le transfert. Leurs valeurs sont mises dans la caractéristique "pièces sollicitant l'opération". A t₀, l'ordre d'exécuter le transfert est envoyé par la commande. P1 est mise dans la caractéristique "pièce en transfert". P2 reste dans la caractéristique "pièces sollicitant l'opération", car le transfert est de capacité un. Deux cas sont maintenant étudiés.

	t < t0	$t0 \le t < \Delta Tm$	$\Delta Tm \le t \le \Delta TM$ C_{R_i}		t > ∆TM
Pièces sollicitant l'opération	{P1}, {P2}	{P2}	{P2}	{P2}	{P2}
Pièce en transfert	_	{P1}	{P1}	<u> </u>	_
Pièces transférées		_	_	{ P 1}	{P1}
Etat de l'opération	N	N	N	N	N

Figure VII-3: Apparition du compte rendu attendu dans la fenêtre Icri

- C_{Ri} arrive dans la fenêtre temporelle [ΔTm, ΔTM] (cf. Figure VII-3), P1 est mis dans la caractéristique "pièces transférées" et la caractéristique "état" de l'opération reste à {normal}. P2 pourra ensuite subir l'opération de transfert dès qu'un nouvel ordre sera envoyé;
- 2. C_{Ri}, correspondant par exemple à la présence d'une pièce à l'emplacement de destination, n'est pas reçu dans la fenêtre temporelle (cf. Figure VII-4), P1 reste dans la caractéristique "pièce en transfert" et la caractéristique "état" de l'opération considérée est mise à {hors-service}. P2 ne pourra subir l'opération de transfert considérée.

	t < t0	$t0 \le t < \Delta Tm$	∆Tm ≤t≤∆TM	$t > \Delta TM$
Pièces sollicitant l'opération	{P1, P2}	{P2}	{P2}	{P2}
Pièce en transfert	-	{P1}	{P1}	{P1}
Pièces transférées	-		_	_
Etat de l'opération	N	N	N	HS

Figure VII-4: Pas de compte rendu après ΔTM

2.1.3 Représentation de l'évolution des produits dans l'architecture

La façon dont est renseignée la caractéristique "pièces sollicitant l'opération" est une information qui vient de la commande (du niveau coordination ou du gestionnaire de ressource). En effet, à un certain niveau de détail de la commande, il est possible de déterminer quelles sont les étapes qu'une pièce doit suivre. Dès qu'une opération est achevée sur une pièce, la caractéristique "pièces usinées" (resp. "pièces transférées", ...) reçoit la valeur mise dans la caractéristique "pièce en usinage" (resp. "pièce en transfert", ...). La commande fait alors connaître quelle sera l'opération suivante. La caractéristique "pièces sollicitant l'opération" de cette dernière reçoit la valeur mise dans la caractéristique "pièces usinées" (resp. "pièces transférées", ...) de l'opération précédente.

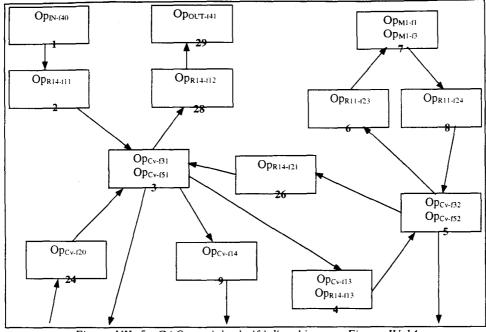


Figure VII- 5: GAO partiel relatif à l'architecture Figure IV-14

La Figure VII-5 reprend une partie de l'exemple précédemment traité au chapitre VI §2.3 (cf. Figure IV-14, p 123). Le SFPM doit fabriquer des pièces P1 nécessitant un tournage sur M1. Une partie de la commande (GO + graphe de commande) est représentée Figure VII-6. Celle-ci fait appel au convoyeur qui est une ressource complexe. Chaque fois qu'une ressource simple est sollicitée, l'opération dont la caractéristique "pièces sollicitant l'opération" reçoit {P1} est donnée par la GO. Lorsqu'une ressource complexe est sollicitée, l'opération est fournie par le gestionnaire inclus dans le graphe de commande de la ressource complexe (cf. Figure VII-6). Il faut noter que les indéterminismes sont levés au niveau de la commande et que le choix est ensuite transcrit au niveau du GAO. Par exemple, le choix de solliciter Op_{Cv}. f₁₃ plutôt que Op_{R14-f13} est déterminé au niveau commande.

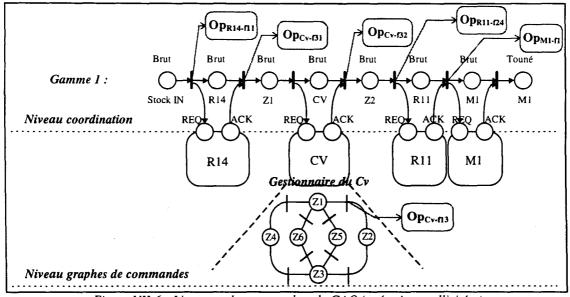


Figure VII-6 : Lien entre la commande et le GAO (opérations sollicitées)

A partir de cette connaissance, le recouvrement détermine si un produit, se trouvant dans l'architecture au moment de l'occurrence d'une panne, doit passer par un poste de litige (cf. chapitre VI §2.2.3).

2.2 Lien avec les familles de modes

L'objectif consiste à préciser comment les informations de la gestion des modes sont utilisées afin de déterminer les ensembles d'opérations dont se servent les procédures d'analyse d'impact et d'évaluation (cf. Figure VII-1).

2.2.1 Caractéristiques liées aux modes

Afin de répercuter au niveau des opérations les trois cas (ressource engagée en production, ressource en attente, ressource à l'arrêt) définis Figure VI-5, la caractéristique "statut" est définie. Le lien avec les modes de fonctionnement est réalisé par la caractéristique "état".

2.2.1.1 Etat d'une opération et modes de fonctionnement

La caractéristique "état" est mise à jour par la surveillance. La connaissance des opérations {hors-service} est la base des traitements de la fonction d'impact de la panne. Cette caractéristique permet aussi de déterminer le mode de fonctionnement de la ressource réalisant les opérations. Il convient tout d'abord de préciser le mode {Dégradé} d'une ressource.

Ce terme renferme de nombreuses définitions. Ainsi la ressource peut être dégradée temporellement, qualitativement, fonctionnellement. Elle est **dégradée temporellement** si elle exécute quand même une fonction mais avec des temps opératoires beaucoup plus longs que ceux d'origine. Elle est **dégradée qualitativement** si elle exécute quand même une fonction mais avec des niveaux de tolérance moindres. Elle est **dégradée fonctionnellement** si elle ne peut plus exécuter une des fonctions pour laquelle elle a été configurée, mais qu'elle peut toujours exécuter au moins une autre fonction. Compte tenu de nos hypothèses sur les pannes complètes, nous ne considérons que des modes dégradés fonctionnellement.

Du point de vue des opérations, une ressource dont toutes les opérations ont pour "état" {normal} est en mode de fonctionnement {Normal}. Si toutes ses opérations ont pour "état" {hors-service}, la ressource est en mode de fonctionnement {Hors-service}. Si une ou plusieurs opérations ont pour "état" {hors-service}, mais qu'il existe au moins une opération, réalisée par la ressource, ayant pour "état" {normal}, alors la ressource est en mode de fonctionnement {Dégradé}. Les changements de modes de fonctionnement sont résumés par la Figure VII-7.

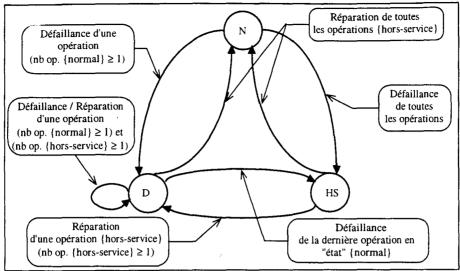


Figure VII-7: Changement d'état d'une ressource en cas de défaillance complète

2.2.1.2 Définition de la caractéristique "statut" d'une opération

La caractéristique "**statut**", définie pour chaque opération, est dynamique. Elle rend compte des modes dans lesquels la ressource réalisant l'opération se trouve et précise même si l'opération prend part à la réalisation d'une GL. Selon les cas, elle prend pour valeur :

- retenue : l'opération est retenue dans une séquence de production par l'ordonnancement actuel. Sa commande est donc présente au niveau des GO et du directeur de commande de la ressource;
- réservée : l'opération est réalisée par une ressource soit engagée en production, soit en attente, mais ne participe pas à la réalisation d'une GL;
- possible : l'opération est réalisée par une ressource à l'arrêt, qui peut être mise en service.

L'association des caractéristiques "statut" et "état" permet de définir les différents cas à considérer pour une opération (cf. Figure VII-8). Une opération est soit hors-service, soit normale. Dans ce dernier cas, elle fait partie des opérations possibles. Elle peut alors être réservée ou non. Si elle est réservée, elle peut être retenue.

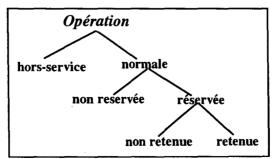


Figure VII-8: Cas considérés pour une opération [BER 98/b]

2.2.2 Application à la procédure de recherche de configuration

Les implications de la caratéristique "statut" au niveau des noeuds sont tout d'abord étudiées. Les ensembles d'opérations à mettre en entrét de la procédure sont ensuite déterminés. Concernant le résultat de la procédure, les modes de l'état objectif sont explicités.

2.2.2.1 Implication de la caractéristique "statut" sur les noeuds

La caractéristique "statut" est répercutée au niveau des noeuds, afin de permettre de déterminer quelle partie du GAO mettre en entrée de la fonction d'impact de panne. Pour chaque noeud, nous avons défini au chapitre IV §3.1.1 la caractéristique "opérations potentielles". Nous définissons maintenant les caractéristiques "opérations possibles", "opérations réservées" et "opérations retenues". Alors que la caractéristique "opérations potentielles" est statique, les nouvelles caractéristiques sont dynamiques.

La caractéristique "**opérations possibles**" rend compte de l'ensemble des opérations encore utilisables au niveau d'un noeud. Cet ensemble est mis à jour lorsque la caractéristique "état" d'une opération du noeud passe à {hors-service}.

La caractéristique "**opérations réservées**" traduit l'ensemble des opérations utilisables du noeud qui sont réalisées par des ressources actives (non arrêtées). Cette caractéristique varie en fonction des modes d'une ressource.

La caractéristique "**opérations retenues**" traduit l'ensemble des opérations réalisables du noeud, que l'on choisit de mettre en oeuvre dans une configuration donnée du SFPM. Cette caractéristique est modifiée en fonction des choix de l'ordonnancement ou du recouvrement.

Le lien entre ces caractéristiques s'effectue comme suit : La caractéristique "opérations possibles" contient l'ensemble des opérations, répertoriées par la caractéristique "opérations potentielles" du noeud, dont la caractéristique "état" est {normal}. La caractéristique "opérations réservées" contient les opérations listées dans la caractéristique "opérations possibles" du noeud, et ayant pour "statut" {réservé} ou {retenu}. La caractéristique "opérations retenues" contient les opérations listées dans la caractéristique "opérations réservées" du noeud, et ayant seulement pour "statut" {retenu}.

A titre **d'exemple**, nous considérons la Figure VII-9 illustrant le cas d'un noeud d'usinage, composé de deux opérations d'usinage, mettant en oeuvre les fonctions de transformation f_1 et f_2 . Compte tenu des règles de regroupement, le noeud d'usinage s'identifie avec la ressource d'usinage. Dans le premier cas, la ressource est en mode de marche {Automatique}, en mode d'arrêt {En marche}, en mode de fonctionnement {Normal}, et en mode d'exploitation {Production}. Elle participe à la réalisation d'une GL en réalisant Op_{M2-f1} . Le deuxième cas

illustre le fonctionnement dégradé. La ressource est en mode de marche {Automatique}, en mode d'arrêt {En marche}, en mode de fonctionnement {Dégradé}, et en mode d'exploitation {Production}. Elle réalisait Op_{M2-f2} . Dans la nouvelle configuration, elle réalise Op_{M2-f1} . Le troisième cas illustre celui d'une ressource en attente, et le quatrième, celui où la ressource est à l'arrêt.

	Op. potentielles	Op. possibles	Op. réservées	Op. retenues
Cas 1	$\{OP_{M2-f1}\}, \{OP_{M2-f2}\}$	${OP_{M2-f1}}, {OP_{M2-f2}}$	${OP_{M2-f1}}, {OP_{M2-f2}}$	{OP _{M2-f1} }
Cas 2	${OP_{M2-f1}}, {OP_{M2-f2}}$	$\{OP_{M2-f1}\}$	${OP_{M2-f1}}$	$\{OP_{M2\text{-}fi}\}$
Cas 3	${OP_{M2-f1}}, {OP_{M2-f2}}$	$\{OP_{M2-f1}\}, \{OP_{M2-f2}\}$	$\{OP_{M2-f1}\}, \{OP_{M2-f2}\}$	Ø
Cas 4	${OP_{M2-f1}}, {OP_{M2-f2}}$	$\{OP_{M2-f1}\}, \{OP_{M2-f2}\}$	Ø	· Ø

Figure VII-9 : Exemple de caractéristiques d'un noeud d'usinage

2.2.2.2 Détermination des ensembles d'opérations en entrée de la fonction d'impact

Si l'on se reporte au principe du §1.1 de ce chapitre, les étapes de 1 à 3 considèrent un GAO constitué d'un nombre de plus en plus important d'opérations, car le critère est de moins en moins restrictif.

L'étape 1 consiste à considérer l'ensemble des opérations, dont la caractéristique "statut" est {retenu}. Tous les noeuds, dont la caractéristique "opérations retenues" est vide, sont retirés du GAO. Le modèle GAO de l'architecture retenue est considéré.

L'étape 2 consiste à considérer l'ensemble des opérations, dont la caractéristique "statut" est {retenu} ou {réservé}. Tous les noeuds, dont la caractéristique "opérations réservées" est vide, sont retirés du graphe initial. Le modèle GAO de l'architecture réservée est considéré.

L'étape 3 consiste à considérer l'ensemble des opérations, dont la caractéristique "état" est {normal}. Tous les noeuds, dont la caractéristique "opérations possible" est vide, sont retirés du graphe initial. Le modèle GAO de l'architecture possible est considéré.

Rappelons que l'étape 4 consiste à considérer une autre production. Le modèle GAO de l'architecture possible, auquel est soustrait l'ensemble des opérations réalisées par la ressource en panne, est considéré.

La fonction d'impact de la panne calcule ensuite les accessibilités et élimine d'autres noeuds.

2.2.2.3 Fonction de détermination de la nouvelle configuration

Cette fonction détermine les nouveaux modes qui seront fournis à la gestion des modes. Ces modes sont déduits des séquences d'opérations retenues. Toutes les opérations de ces séquences voient leur caractéristique "statut" mise à {retenue}. Ceci implique, pour chaque opération, de mettre la ressource listée dans la caractéristique "support de réalisation" en mode de marche {Automatique}, en mode d'arrêt {En marche}, et en mode d'exploitation {Production}. Si toutes les opérations réalisées par la ressource ont pour caractéristique "état" {normal}, la ressource est en mode {Normal}. Sinon elle passe en mode de fonctionnement {Dégradé}. Les opérations, réalisées par ces ressources et non retenues, prennent pour "statut" {réservé}.

Toutes les autres ressources sont mises en mode de marche {A l'arrêt}, en mode d'arrêt {Hors-tension}, et en mode d'exploitation {Au repos}. Son mode de fonctionnement dépend du nombre d'opérations en "état" {normal} et du nombre d'opérations en "état" {hors-service}. Une ressource, ayant toutes ses opérations à {hors-service} passe en mode de fonctionnement {Hors-service}. Une ressource, ayant toutes ses opérations à {normal} reste en mode de fonctionnement {Normal}.

3. Procédure de recherche de chemins dans le GAO

Notre approche base la recherche de configuration sur une recherche de chemins dans un GAO qui prend en compte un nombre variable d'opérations. Nous avons présenté dans les sections précédentes comment faire varier les opérations à considérer, afin d'obtenir une recherche progressive de potentialités. Cette section précise comment la procédure de recherche de chemins dans un graphe orienté pouvant posséder des boucles est mise en oeuvre. Deux algorithmes principaux, correspondant respectivement aux fonctions d'évaluation de la capacité à réaliser une GL et de recherche des séquences, sont détaillés.

La recherche de chemins dans un graphe orienté est un problème polynomial assez connu de la littérature [LAU 86], [AHO 89], [GON 95]. A titre d'exemple, nous citons les algorithmes de Moore Dikjstra, Floyd et l'algorithme A*. Nous présentons une variante adaptée au GAO, permettant de déterminer tous les chemins, et ayant l'avantage de réduire la combinatoire, ce qui permet d'avoir des temps de calcul raisonnables au niveau de la procédure exécutée en-ligne.

3.1 Principe : séparation entre recherche d'existence et détermination explicite

Le principe est fondé sur la séparation entre la recherche d'existence d'au moins un chemin et la détermination explicite de tous les chemins possibles. Ce fractionnement des traitements était d'ailleurs apparu lors de la présentation de la structuration du recouvrement (la fonction

de capacité à réaliser une GL est dissociée de la fonction de recherche des séquences). Il permet de ne lancer la détermination des chemins qu'après s'être assuré de l'existence.

Un gain est ainsi réalisé en cas d'échec de la procédure d'existence, puisque cette dernière est moins coûteuse qu'une détermination explicite. En cas de succès de la procédure d'existence et afin d'éviter de refaire une partie des calculs, des marqueurs sont laissés dans le graphe par cette dernière procédure, et sont ensuite utilisés par la détermination des chemins. Ces marqueurs permettent de réduire la combinatoire de la seconde procédure.

Pratiquement, le principe s'inspire d'un système expert à raisonnement mixte. La première procédure parcourt le graphe depuis l'entrée vers la sortie et marque les noeuds susceptibles de participer à la réalisation d'une GL. Elle réalise un balayage large des solutions, par chaînage avant. La seconde procédure va réaliser un parcours inverse du graphe (du noeud de sortie au dernier noeud marqué, ...). Elle réalise un chaînage arrière pour vérifier la solution et l'expliciter.

Ces deux procédures nécessitent de spécialiser la caractéristique d'accessibilité qui est utilisée pour marquer les noeuds.

3.2 Spécialisation de la caractéristique d'accessibilité

La perte d'un noeud du graphe peut n'avoir aucun impact concernant la disponibilité d'une fonction, mais peut empêcher le SFPM de réaliser une GL [BER 98/b]. En effet, dans une configuration donnée, la réalisation d'une GL par le SFPM est vue au niveau du GAO, comme une séquence d'opérations à réaliser de façon continue et dans un ordre précis. Ce chemin peut être interrompu par la disparition d'un noeud sans pour autant qu'un noeud de transformation soit non-Acc.E. (cf. Figure VII-10, la perte du noeud 9 empêche de réaliser la séquence f_1, f_2 . Pourtant les noeuds 4 et 6 sont toujours Acc.E.). Il faut donc non seulement savoir si un noeud peut être atteint à partir du noeud d'entrée, mais aussi s'il peut l'être à partir d'autres noeuds mettant en oeuvre des fonctions de transformation particulières.

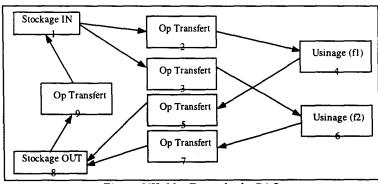


Figure VII-10: Exemple de GAO

3.2.1 Définitions

La caractéristique d'accessibilité est donc spécialisée pour les noeuds de transformation et le noeud de sortie sous la forme d'accessibilité vis à vis d'une GL. Cette dernière permet de déterminer si les opérations d'usinage d'un noeud peuvent prendre part à la réalisation d'une GL. Nous la définissons de la façon suivante :

<u>Définition 1</u>: Un noeud de transformation, mettant en oeuvre la fonction f_i , est accessible vis à vis d'une GL f_1 , f_2 ,..., f_{i-1} (noté Acc. / GL), s'il existe un chemin dans le GAO ayant pour origine le noeud d'entrée et passant successivement par des noeuds de transformation, mettant respectivement en oeuvre les fonctions f_1 , f_2 ,..., f_{i-1} .

La définition 1 s'interpréte récursivement, ce qui facilite la détermination de la caractéristique.

<u>Définition 2</u>: Un noeud de transformation, mettant en oeuvre la fonction f_i , est Acc. / $(f_1, f_2, ..., f_{i-1})$, s'il existe un chemin dans le GAO qui permet de l'atteindre à partir d'un noeud de transformation mettant en oeuvre la fonction f_{i-1} et Acc. / $(f_1, f_2, ..., f_{i-2})$.

Par exemple, un noeud, mettant en oeuvre la fonction f_3 , est Acc. / (f_1, f_2) s'il est accessible depuis un noeud mettant en oeuvre la fonction f_2 , lui-même accessible depuis un noeud mettant en oeuvre la fonction f_1 , lui-même Acc.E.

Pratiquement, la caractéristique reçoit {entrée} si le noeud est Acc.E. Elle reçoit $\{f_1\}$ pour un noeud mettant en oeuvre f_k et Acc. / (f_1) . Elle reçoit $\{f_1,f_2\}$ pour un noeud mettant en oeuvre f_k et Acc. / (f_1,f_2) ... Pour le noeud de sortie, elle reçoit $\{f_1,...,f_n\}$ si ce noeud est Acc. / $(f_1,...,f_n)$. La mise à jour de cette caractéristique est d'un grand intérêt pour la recherche des séquences d'opérations.

3.2.2 Propriétés

Les évolutions de la caractéristique d'accessibilité se font sur changement de la caractéristique "état" de n'importe quel noeud du graphe.

<u>Propriété 1</u>: Le SFPM est capable de réaliser $f_1, f_2, ..., f_n$ si et seulement si son noeud de sortie est Acc. / $(f_1, f_2, ..., f_n)$.

En effet, compte tenu des définitions précédentes, il existe au moins un chemin depuis l'entrée vers la sortie passant successivement par des noeuds de transformation, mettant respectivement en oeuvre les fonctions de transformation de la GL. En d'autre terme il existe au moins une séquence d'opérations permettant de réaliser la GL.

Propriété 2: Un noeud Acc. / GL est Acc.E.

Nous soulignons que la contraposée de cette propriété est utilisée dans la fonction d'évaluation du SFPM. En effet, cette fonction se décompose en une fonction de détermination des fonctions délivrées, qui s'intéresse à l'Acc. E. des noeuds de transformation, et une fonction de capacité à poursuivre une gamme, qui s'intéresse à l'Acc. / GL de ces noeuds.

<u>Propriété 3</u>: Pour un graphe dont la sortie reboucle sur l'entrée (c'est-à-dire fortement connexe au départ), la réciproque de la propriété 2 est vérifiée (cf. Figure VII-10).

<u>Remarque</u>: Cette propriété sera intéressante pour la conception d'un SFPM qui reste moins perturbé par une panne.

3.3 Détail des deux fonctions

Nous présentons comment sont marqués les noeuds en accessibilité vis à vis d'une GL, puis comment sont déterminées les séquences d'opérations permettant de réaliser la GL.

3.3.1 Détermination des noeuds en accessibilité vis à vis d'une gamme logique [BER 98/b]

Compte tenu des remarques précédentes, l'algorithme proposé vérifie que le noeud de sortie est Acc. / GL. Il recherche seulement l'existence d'un chemin, sans le déterminer explicitement. Il marque aussi les noeuds de transformation intermédiaires susceptibles de participer à la réalisation de la GL. Par exemple, si la GL est notée $f_1, f_2, ..., f_n$, il note les noeuds Acc. / (f_1) , les noeuds Acc. / (f_1, f_2) , ..., les noeuds Acc. / $(f_1, f_2, ..., f_{n-1})$. Ceci équivaut à un parcours avant d'un graphe dans lequel sont marqués les noeuds susceptibles de participer à la réalisation de f_1 ; f_1, f_2 ; ...; $f_1, f_2, ..., f_n$.

L'algorithme 1 (cf. Figure VII-11) utilise les résultats sur les noeuds Acc.E. et sur les noeuds Blq.S. Il marque la caractéristique "accessible" d'un noeud de transformation et du noeud de sortie comme indiqué au §3.2.1 de ce chapitre.

Considérons une gamme logique $f_1,...,f_n$. ANB f_j représente l'ensemble des noeuds de transformation Acc.E. et non-Blq.S. mettant en oeuvre f_j . ANB $f_1,...,f_j$ représente l'ensemble des noeuds de transformation Acc / $(f_1,...,f_j)$ en non Blq.S.



```
\begin{aligned} & \forall j \in \{1,n\} \  \  \, \text{ANBf}_j = \varnothing \;; \; \forall j \in \{2,n\} \  \, \text{ANBf}_1, \dots, f_{j-1}, f_j = \varnothing \;; \; (* \text{ initialisation } *) \\ & \underline{\text{Boucle 1: } Pour \text{ chaque fonction } f_j \text{ de la GL } faire} \\ & \bullet \quad D \text{\'eterminer } ANBf_j \;; \\ & \bullet \quad \text{Mettre } \{f_j\} \text{ dans "accessible" de chaque \'el\'ement de } ANBf_j \;; \\ & \underline{\text{Boucle 2: } Pour \text{ chaque \'el\'ement } \text{NOp}_x \text{ de } ANBf_j \textit{faire}} \\ & \bullet \quad \underline{s'il} \text{ existe un chemin entre un \'el\'ement de } ANBf_1, \dots, f_{j-1} \text{ et } \text{NOp}_x \textit{ alors } faire} \\ & \bullet \quad mettre \; \{f_1, \dots, f_{j-1}\} \text{ dans "accessible" de } \text{NOp}_x \;; \; (* \text{ i.e. } \text{NOp}_x \in \text{ANBf}_1 \dots f_j \;*)} \\ & \bullet \quad \text{NOp}_x \in \text{ANBf}_1 \dots f_j \;; \\ & \bullet \quad fin \, si \\ \hline \text{Fin Boucle 2} \\ \hline \text{Fin boucle 1} \\ \underline{Si} \text{ ANBf}_1 \dots f_n \neq \varnothing \text{ alors } \text{mettre } \{f_1, \dots, f_n\} \text{ la caract\'eristique "accessible" du noeud de sortie }; \\ \underline{\text{END}}. \end{aligned}
```

Figure VII-11: Algorithme de détermination des noeuds Acc. / GL

3.3.2 Détermination explicite des chemins dans le graphe [BER 98/b]

Cette seconde étape est appliquée lorsque l'existence de chemins est prouvée. Puisque le GAO peut contenir des boucles, certains chemins sont susceptibles d'emprunter plusieurs fois le même noeud. Ils ne doivent pas pour autant boucler. Nous choisissons de fractionner chaque chemin allant du noeud d'entrée au noeud de sortie en chemins élémentaires. Ces derniers ont la particularité de ne pas contenir de boucle, de ne pas contenir de noeud de transformation intermédiaire, et de relier deux noeuds de transformation successifs. Un chemin élémentaire relie donc un noeud de transformation Acc. / $(f_1, ..., f_{j-1})$, mettant en oeuvre f_j à un noeud de transformation Acc. / $(f_1, ..., f_j)$, mettant en oeuvre f_{j+1} .

L'algorithme utilise la connaissance des noeuds $Acc./(f_1)$, $Acc./(f_1,f_2)$, ..., et $Acc./(f_1,f_2,...,f_{n-1})$. Pour chaque ensemble $ANBf_1,...,f_j$ et $ANBf_1,...,f_{j+1}$, il recherche les chemins élémentaires entre un noeud du premier ensemble et un noeud du second. En fait, l'existence d'un chemin entre un noeud quelconque de $ANBf_1,...,f_j$ vers un noeud quelconque de $ANBf_1,...,f_{j+1}$ n'est pas forcément vérifiée. Le premier algorithme spécifie uniquement que, pour chaque noeud de $ANBf_1,...,f_{j+1}$, il existe au moins un chemin à partir d'un noeud de $ANBf_1,...,f_j$. Ainsi des noeuds de $ANBf_1,...,f_j$ peuvent ne pas participer à la réalisation de $f_1,...,f_n$. De façon à réduire la combinatoire, l'algorithme commence par déterminer les chemins élémentaires de $ANBf_1,...,f_n$ vers le noeud de sortie. Puis, pour chaque noeud N_k de $ANBf_1,...,f_n$, il détermine les chemins élémentaires reliant les noeuds de $ANBf_1,...,f_{n-1}$ et N_k . Si des noeuds de $ANBf_1,...,f_{n-1}$ ne sont pas à l'origine d'un chemin élémentaire, ils sont retirés

de l'ensemble. La détermination des chemins entre les noeuds de ANB $f_1,...,f_{n-2}$ et ceux de ANB $f_1,...,f_{n-1}$ se fera en considérant moins de noeuds de destination.

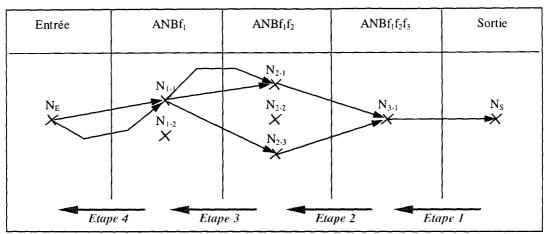


Figure VII-12 : Principe de la détermination explicite des chemins

Exemple: Dans la Figure VII-12, l'étape 1 détermine un chemin élémentaire. Pour l'étape 2 les chemins de N_{2-1} à N_{3-1} , N_{2-2} à N_{3-1} , et N_{2-3} à N_{3-1} sont étudiés. Puisque aucun chemin, ayant pour origine N_{2-2} , n'est trouvé, l'étape 3 ne considère plus N_{2-2} comme destination d'un éventuel chemin élémentaire. Il en va de même pour N_{1-2} dans l'étape 4. Les chemins complets sont une concaténation des chemins élémentaires trouvés.

L'algorithme 2 est présenté Figure VII-13. Il reçoit en entrée les ensembles $ANBf_1,...,f_n$ issus de l'algorithme 1 (par convention, $ANBf_1,...,f_{n+1}$ contient le noeud de sortie). Il fournit un ensemble de chemins.

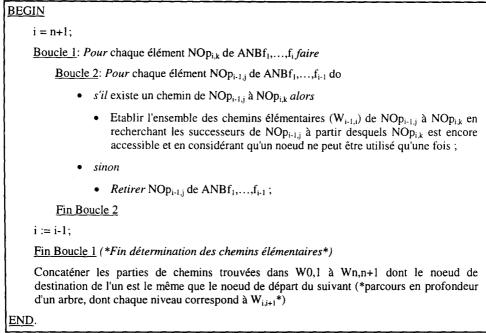


Figure VII-13: Algorithme de détermination des chemins

Ces algorithmes sont appliqués en annexes.

3.3.3 Illustration des fonctions

Considérons l'exemple Figure IV-14. Nous supposons que le SFPM représenté réalise la GL f_1, f_2 . Les résultats des deux algorithmes sont explicités Figure VII-14. L'algorithme 1 donne les ensembles ANB f_1 ={N7, N15} et ANB f_1 f $_2$ ={N20}. L'algorithme 2 donne 1 chemin de [N20 \rightarrow OUT], 2 chemins de [N15 \rightarrow N20], 4 chemins de [N7 \rightarrow N20], 2 chemins de [IN \rightarrow N15], et 1 chemin de [IN \rightarrow N7].

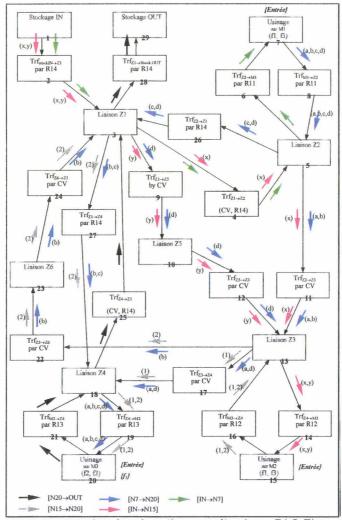


Figure VII-14: Résultat des algortihmes appliqués au GAO Figure IV-14

4. Application des résultats de la tolérance à la recherche de configuration

Comme précisé en fin de la partie B, la reconfiguration du SFPM est d'autant plus aisée que son architecture est tolérante. Dans cette section, les liens entre la tolérance et la procédure de recherche de configuration sont étudiés. Nous montrons comment certains résultats de la tolérance permettent de conclure directement quant aux options à considérer pour la procédure présentée, ce qui contribue à son amélioration.

4.1 Analogie entre les deux approches

L'analogie concerne principalement l'évaluation de la tolérance de l'architecture et l'évaluation du SFPM concernant sa capacité à réaliser une GL. Des similitudes se dégagent tout d'abord des objectifs de chaque approche. Toutes deux s'intéressent au SFPM du point de vue de sa sûreté de fonctionnement. L'impact d'une panne sur la capacité du SFPM à délivrer des fonctions de transformation est plus particulièrement pris en considération. Mais, l'évaluation de la tolérance est effectuée hors-ligne et s'applique à tous les éléments du SFPM, alors que la recherche de configuration s'effectue en-ligne et considère différentes parties d'une architecture.

Dans les deux approches, le principe d'évaluation est fondé sur une existence de chemins dans une architecture modélisée par GAO, une fois que la disparition des entités en panne a été répercutée. Pour la tolérance, l'élément est supposé être en panne et le SFPM sans cet élément est évalué. Il s'agit alors d'une méthode de prévision de pannes. Pour la recherche de configuration, l'architecture sans les éléments en panne est évaluée, mais du point de vue de sa capacité à réaliser une GL.

4.2 Conséquences

Il résulte des remarques précédentes que la méthode d'évaluation de la tolérance s'utilise non-seulement durant la phase de conception, de façon à obtenir l'architecture la plus tolérante aux pannes possible, mais aussi pour la prévision de pannes. Certains aspects des pannes ont dans ce cas déjà été étudiés et sont utilisables dans la procédure de recherche de configuration.

4.2.1 Conséquences générales

D'une façon générale, plus les indices de criticité, définis au chapitre V §3, sont proches de 1. moins l'architecture est tolérante, donc plus la reconfiguration sera délicate, voire impossible. Pour des architectures de ce type, la recherche de configuration débutera directement en considérant l'ensemble des potentialités de l'architecture. Si l'arrêt complet du SFPM n'est pas souhaité, un changement de production sera souvent nécessaire. Le choix de la GL est là aussi influencé par la tolérance de l'architecture : La GL choisie sera celle qui permet d'avoir un Ic / GL faible.

4.2.2 Connaissance des éléments sensibles

Nous nous intéressons à l'aspect local de la tolérance, c'est-à-dire aux éléments critiques de l'architecture. Dans la suite nous nous intéressons principalement aux opérations critiques. Une étude similaire, à partir de la connaissance des ressources critiques, donne des résultats équivalents.

D'après le principe de recherche des opérations critiques (cf. chapitre V $\S 2.1$), il y a équivalence entre indisponibilité d'une fonction de transformation f_i et le fait qu'une opération crit/ f_i soit en panne. Les conséquences sont résumées dans les règles suivantes :

Règle 1: Si une opération crit/ f_i est {hors-service}, le SFPM n'est plus en mesure de réaliser une GL faisant appel à la f_i .

<u>Règle 2</u>: Si une opération, dont le taux de criticité est égal à 1, est {hors-service}, aucune configuration ne peut permettre au SFPM de réaliser une GL. Le système doit être arrêté.

Ces règles permettent de conclure directement à propos de résultats qui seraient fournis par la fonction d'évaluation du recouvrement. On s'affranchit ainsi du calcul en-ligne des fonctions disponibles.

4.3 Evolutions apportées [BER 98/c]

Avant d'intégrer des résultats précalculés, issus de l'évaluation de la tolérance, dans une nouvelle procédure de recherche de configuration, la méthode de détermination des opérations critiques est étendue.

4.3.1 Extension de la détermination des opérations critiques

Puisque le recouvrement évalue successivement 3 types d'architecture (retenue, réservée et possible), la détermination des opérations critiques est aussi appliquée aux architectures retenues et réservées (cf. Figure VII-15). Dès que les opérations retenues sont connues, deux GAO constitués des opérations ayant pour "statut" {retenu} et pour "statut" {retenu} ou {réservé} sont déterminés. Les opérations critiques de ces deux GAO sont déterminées horsligne ou en parallèle pendant la phase de production. Ces nouvelles opérations critiques sont appelées opérations critiques par rapport à f_i basée sur l'architecture retenue (resp. réservée) et notées Op.crit/f_i_Arch.ret. (resp. Op.crit/f_i_Arch.res.). Elles sont liées par la propriété suivante :

<u>Propriété</u>: Pour une opération de "statut" {retenu}, si cette opération est crit / f_i, alors c'est une Op.crit/f_{i_}Arch.res. et une Op.crit/f_{i_}Arch.ret.

En effet, les deux GAO sont des sous ensembles du GAO initial. \square

La réciproque peut ne pas être vérifiée. Considérons le GAO Figure IV-16, p 126. Si M2 n'est pas retenue, alors Op_{M2-f1} ne fait pas partie de l'architecture retenue et Op_{R11-f23} est crit/f₁_Arch.ret. Pourtant, Op_{R11-f23} n'est pas crit/f₁

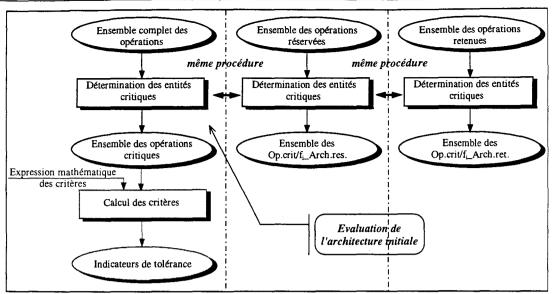


Figure VII-15: Calcul des 3 ensembles d'opérations critiques

4.3.2 Nouvelle procédure

Seule la fonction d'évaluation du système est modifiée. L'enchaînement des autres fonctions reste conforme à la Figure VI-10. La nouvelle fonction d'évaluation du système est décrite Figure VII-16. Le schéma détaillé de la procédure est présenté en annexes. La connaissance des Op.crit/f_i, Op.crit/f_i_Arch.res., et Op.crit/f_i_Arch.ret. permet d'anticiper sur les résultats de la fonction d'évaluation du système. Cette dernière n'est donc pas appelée dans ce cas. Nous supposons que ces opérations sont déjà connues. Ainsi, dans la Figure, l'architecture retenue (resp. réservée) contient l'ensemble des opérations retenues (resp. réservée) et l'ensemble des Op.crit/f_i_Arch.ret. (resp. Op.crit/f_i_Arch.res.). Les modifications sont référencées comme suit :

- La valeur du taux de criticité d'une opération, déterminée lors d'une analyse de l'architecture initiale, permet de savoir si la panne de l'opération peut rendre indisponible la totalité des fonctions de transformation délivrées par le SFPM (cf. chapitre V §2.2.2). Il n'est même pas possible de trouver une autre configuration permettant au SFPM de produire.
- Si l'opération est crit/f_i_Arch.ret., avec f_i faisant partie d'une GL actuellement produite, le recouvrement décide que l'architecture retenue n'est pas suffisante pour continuer la production et essaie directement une évaluation de l'architecture réservée.
- ❸ Si l'opération est crit/f_i_Arch.res., avec f_i faisant partie d'une GL actuellement produite, le recouvrement décide que l'architecture réservée n'est pas suffisante pour continuer la production et essaie directement une évaluation de l'architecture totale.
 - Un raisonnement identique permet de conclure qu'il faut choisir une autre production.

La procédure de recherche de configuration, qui tient compte des résultats de la tolérance, gagne ainsi en réactivité car une partie des calculs est déjà réalisée hors-ligne.

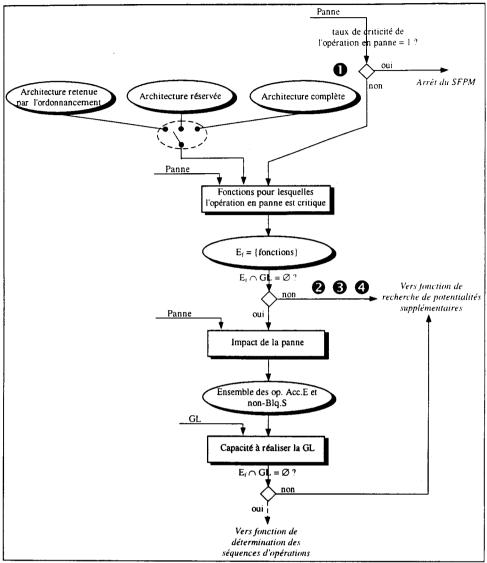


Figure VII-16: Nouvelle fonction d'évaluation du système

5. Exemple d'application

Nous reprenons l'exemple Figure IV-14, p 123 et p 126. Nous supposons que le SFPM représenté réalise la GL f₁,f₂. La configuration initiale choisie par l'ordonnancement consiste à utiliser uniquement les opérations Op_{IN-f40}, Op_{R14-f11}, Op_{Cv-f31}, Op_{Cv-f51}, Op_{Cv-f31}, Op_{Cv-f32}, Op_{Cv-f52}, Op_{R11-f23}, Op_{M1-f1}, Op_{R11-f24}, Op_{Cv-f15}, Op_{Cv-f53}, Op_{Cv-f17}, Op_{Cv-f34}, Op_{Cv-f34}, Op_{Cv-f34}, Op_{R13-f27}, Op_{M3-f2}, Op_{R13-f28}, Op_{Cv-f19}, Op_{R14-f12}, et Op_{OUT-f41}. Les ressources R12 et M2 sont en mode d'arrêt {Hors-tension} et en mode d'exploitation {Au repos}. Les autres ressources sont en mode de marche {Automatique} et en mode d'exploitation {Production}. Différents cas sont envisagés.

- 1. Dû à un problème d'aiguillage du convoyeur, Op_{Cv-f13} est en panne. Comme cette opération est crit/f₁_Arch.ret. et crit/f₂_Arch.ret., l'utilisation des opérations réservées est envisagée. Op_{Cv-f13} n'est ni crit/f₁_Arch.res. ni crit/f₂_Arch.res. Selon le résultat de la fonction d'évaluation, appliquée directement à l'architecture réservée, le SFPM peut toujours fabriquer la GL. Parmi les séquences déterminées, celle ne modifiant pas trop la séquence initiale consiste à utiliser Op_{R14-f13} à la place de Op_{Cv-f13}. La nouvelle configuration consiste à mettre le convoyeur en mode de fonctionnement {Dégradé} et à modifier une partie de la commande de R14 et de CV;
- 2. Une panne du robot R11 rend inutilisables les opérations Op_{R11-f23} et Op_{R11-f24}. R11 est crit/f₁. Arch.res., mais n'est pas crit/f₁. L'ensemble des opérations possibles est directement pris en compte. En utilisant la ressource M2, le SFPM est toujours capable de fabriquer la GL. La séquence retenue utilise les opérations Op_{IN-f40}, Op_{R14-f11}, Op_{Cv}- $_{f31}$, Op_{Cv-f51} , Op_{Cv-f14} , Op_{Cv-f35} , Op_{Cv-f35} , Op_{Cv-f33} , Op_{Cv-f33} , $Op_{R12-f25}$, Op_{M2-f1} , $Op_{R12-f26}$, $Op_{Cv-f17}, Op_{Cv-f34}, Op_{Cv-f54}, Op_{R13-f27}, Op_{M3-f2}, Op_{R13-f28}, Op_{Cv-f19}, Op_{R14-f12}, et Op_{OUT-f41}$. Le critère d'optimisation retenu est le temps mis pour atteindre Op_{M2-f1}. Pour la suite de la séquence, on tente de modifier le moins possible la séquence initiale. La nouvelle configuration consiste à mettre R11 en mode de marche {A l'arrêt}, en mode d'arrêt {Hors-tension}, en mode d'exploitation {Au repos} et en mode de fonctionnement {Hors-service}. La maintenance est sollicitée pour réparation de la ressource. M1 est mise en mode de marche {A l'arrêt}, en mode d'arrêt {Hors-tension}, en mode d'exploitation {Au repos} et reste en mode de fonctionnement {Normal}. R12 et M2 sont mis en mode de marche {Automatique}, en mode d'arrêt {En marche}, en mode d'exploitation {Production} et en mode de fonctionnement {Normal}. Les autres ressources restent dans les modes initiaux;
- 3. R13 est en panne. Cette ressource est crit/f₂. Sans faire appel aux fonctions d'évaluation, le recouvrement déduit qu'il faut changer de production et choisir une GL ne contenant pas de fonction de transformation f₂;
- 4. Une panne d'une fonctionnalité de R14 rend {hors-service} Op_{R14-f11}. Cette opération est critique et a un taux de criticité de 1. Sans autres calculs, le recouvrement conclut à l'arrêt du SFPM et à la réparation de la ressource.

CONCLUSION

L'approche décisionnelle de la reconfiguration nous a conduit à structurer le recouvrement selon des fonctions d'analyse d'impact de la panne, d'évaluation d'architecture, de recherche de potentialités supplémentaires, de détermination et d'évaluation de séquences d'opérations. Une mise en oeuvre a ensuite été présentée sous la forme d'une procédure de recherche de configuration exploitant en-ligne le GAO. Cette procédure donne l'état objectif (production à réaliser, ressources à considérer, ...). Pour cela, le recouvrement envisage successivement différents niveaux de réaction. Il détermine ainsi :

- 1. si, dans sa configuration initiale, le SFPM a suffisamment de degrés de liberté (au niveau de sa commande), afin de continuer à produire ;
- 2. si de nouvelles commandes doivent être activées de façon à solliciter les ressources en attente ;
- 3. si de nouvelles ressources doivent être mises en marche, puis sollicitées ;
- 4. si une nouvelle production doit être envisagée afin de maintenir une partie du SFPM en production.

Pour statuer, différentes parties de l'architecture (retenue, réservée, possible) sont évaluées selon deux critères :

- la disponibilité des fonctions de transformation qui constituent la GL;
- la capacité à délivrer, dans l'ordre et en une fois (sans remise de la pièce en entrée du SFPM), les fonctions de transformation de la GL.

Une fois le SFPM reconnu apte à poursuivre une production, la recherche des opérations effectivement utilisées est réalisée. Toutes ces fonctions utilisent le GAO comme support d'information et de raisonnement. L'intérêt est d'utiliser un modèle déjà élaboré pour l'approche passive hors-ligne (cf. partie B). De façon à fournir l'état actuel du SFPM, le GAO est enrichit et devient un système d'information actif renseigné en-ligne par la surveillance, la commande, et par la gestion des modes pour ce qui concerne la configuration de départ.

Parmi les améliorations apportées, la prise en compte de la qualité des produits (grâce aux caractéristiques représentant leur évolution au sein du GAO et grâce à la modélisation des postes de contrôle) permet d'envisager des options moins radicales qu'une évacuation complète des produits présents dans le SFPM au moment de la défaillance.

Conclusion

Notre approche de la reconfiguration se résume à trouver de nouveaux chemins dans une architecture modélisée par GAO, lorsque certaines opérations disparaissent. L'originalité de la méthode consiste à appliquer des résultats de la théorie des graphes afin d'obtenir un espace de solution. L'évaluation, en terme de temps de production de chaque solution, permet non seulement de choisir une solution acceptable, mais aussi de prédire sur une période la capacité de production du SFPM. Cette donnée est essentielle pour un calcul d'ordonnancement en parallèle. Puisque le recouvrement est sollicité en ligne, le problème est volontairement réduit à un problème polynomial, moins complexe qu'un problème d'ordonnancement.

La procédure est optimisée en prenant en compte les résultats issus des évaluations horsligne de la tolérance. Ceux-ci donnent une idée a priori de la marge de manoeuvre dont le recouvrement dispose et évitent de lancer des calculs de disponibilité. Mais, ils n'affranchissent pas de la recherche d'existence d'un chemin.

La méthode de détermination des chemins permet de réduire la combinatoire en se basant sur des principes proches aux raisonnements des systèmes experts. L'existence des chemins est tout d'abord étudiée, puis ceux ci sont explicitement déterminés. La combinatoire est réduite en utilisant un algorithme qui fait un marquage des noeuds potentiellement utilisables (recherche avant). Puis, une recherche arrière détermine le chemin, par morceaux, en utilisant ces contraintes de passage.

Lorsqu'une panne est détectée et diagnostiquée, la procédure de recherche de configuration est lancée. En fonction des stratégies énoncées, de l'impact de la panne, elle détermine les ressources à mettre en marche, celles à arrêter, et les séquences de commandes à considérer. Les décisions sont ensuite appliquées par les modules de gestion des modes et de pilotage.

Conclusion générale

Synthèse

Les travaux exposés dans ce mémoire traitent de la prise en compte des pannes dans les Systèmes Flexibles de Production Manufacturière. La contribution a porté sur plusieurs aspects.

La partie A nous a permis de montrer l'intérêt de la supervision. Elle a souligné l'étendue et la diversité des études réalisées sur ce thème. Il s'est agi ensuite de structurer la supervision et de s'intéresser aux mécanismes qu'elle met en œuvre dans le cas d'un fonctionnement normal et dans le cas d'une réaction après défaillance. La démarche a consisté à intégrer les travaux de l'équipe PFM en matière de surveillance, de gestion des modes et de commande. Cette structuration de la supervision a été positionnée vis à vis d'autres contributions nationales. Nous tenons à signaler que la terminologie, proposée dans ce mémoire, est fortement influencée par la culture du LAIL. Il est clair que certains termes sont amenés à évoluer, notamment à l'issue des travaux auxquels nous participons au sein du GRP. Nous avons présenté un point de vue à l'instant présent de la rédaction.

Pour compléter cette boucle de réaction, il s'est avéré essentiel de s'intéresser au recouvrement. La supervision nous étant apparue comme faisant intervenir des modules informationnels, décisionnels et opérationnels, il est devenu possible de spécifier précisément le rôle du recouvrement, comme étant celui qui décide de la réaction à adopter face à une défaillance.

Deux approches, que nous nous sommes évertués de présenter au cours du mémoire, ont été identifiées comme permettant d'aboutir à un système qui reste en fonctionnement en dépit d'une réduction du potentiel opératoire causé par une panne. L'approche passive consiste à concevoir le système de façon à ce que la panne d'un élément n'influe pas trop sur la marche générale du système. L'approche active met en oeuvre un ensemble de réactions qui permettent de contrer l'effet de la défaillance sur le fonctionnement du SFPM. Elle est mise en œuvre en exploitation. Il faut noter que l'approche active sera d'autant plus efficace qu'il aura été accordé de l'importance à l'approche passive. Il nous est donc apparu nécessaire de situer notre contribution à la fois au niveau de la conception et au niveau de l'exploitation.

Afin d'élaborer sa décision, le recouvrement a besoin d'analyser l'état actuel du SFPM, les potentialités de l'architecture de production, en fonction de stratégies fixées par avance. Ce point nous a amené à étudier si l'architecture possède assez de potentialités afin d'envisager

l'élaboration d'une réaction différente de l'arrêt complet du SFPM. La partie B a donc détaillé l'approche passive en insistant sur une méthode permettant d'évaluer quantitativement la tolérance aux pannes des architectures. Cette analyse se situe entre une analyse fonctionnelle et une analyse purement structurelle, puisqu'elle étudie l'aspect coopératif d'entités correspondant à une projection des fonctions sur une architecture matérielle [SIM 95]. L'intérêt des critères proposés a été montré au travers d'analyses d'architectures types et d'études relatives à la flexibilité.

La partie C a développé l'approche active permettant d'exploiter le SFPM en cas de pannes. Dépassant le niveau purement conceptuel, elle s'est intéressée à décrire les fonctions à mettre en oeuvre afin de déterminer une nouvelle configuration pour le SFPM. Cette procédure de recherche de configuration se situe après les phases de détection et de diagnostic mises en oeuvre par la surveillance. La résolution des indéterminismes selon plusieurs niveaux a permis d'envisager une réaction par étape, en fonction de la difficulté de mise en oeuvre. La proximité des problématiques du recouvrement et de l'ordonnancement a été mentionnée. Mais, en raison d'impératifs liés au temps de réaction, la solution proposée par le recouvrement n'est optimale que par rapport à un nombre restreint de critères. La collaboration des deux modules est donc souhaitée, lorsque le temps de réparation s'avère important.

Les deux approches ont été traitées sur la base d'un SFPM modélisé par GAO. Les SFPM concernés étant en effet caractérisés par une forte complexité, leur exploitation dans un but précis est liée au traitement d'informations pertinentes qui sont représentées par un modèle. Les modèles déjà développés ayant montré leurs limites, nous nous sommes orientés vers un modèle dédié au recouvrement, mais qui reste ouvert vis à vis des autres modules de la supervision. Le modèle présente comme avantage d'être facilement adaptable, de fournir une aide au concepteur pour le calcul des éléments sensibles du SFPM et de garder en exploitation une image du procédé. Ce modèle étant original, il nous a paru important de préciser la démarche permettant de l'obtenir sans ambiguïtés.

Nous nous sommes aussi intéressés à proposer des algorithmes tenant compte des contraintes imposées par une exécution en ligne : la recherche d'existence du chemin est exécutée en phase préliminaire de sa détermination explicite ; les résultats précalculés issus de la tolérance sont réutilisés dans les procédures en ligne.

Bilan

Concernant les intérêts des travaux présentés nous insisterons sur :

- le fait d'avoir complété la boucle de réaction de la supervision dans une approche intégrant l'aspect décisionnel. La prise en compte et le développement de procédure de recouvrement permet d'améliorer la disponibilité du SFPM vis à vis des productions planifiées;
- l'intérêt d'utiliser les graphes pour résoudre les problèmes de décision liés au recouvrement ;
- la prise en compte de la sûreté de fonctionnement en conception et en exploitation.

 Nous avons notamment montré comment ces deux aspects étaient liés;
- l'utilisation du même modèle pour mener à bien les calculs de tolérance (détermination des éléments sensibles) et de recherche de configuration. L'utilisation des informations issues des analyses en conception a ainsi été rendue possible afin d'améliorer les traitements en phase d'exploitation;

Les limites importantes mises en évidence sont listées dans les points suivants :

- L'intégration est principalement centrée sur les données.
- La démarche est mise en oeuvre sur la base d'un recouvrement centralisé, qui a une vision générale du système. Si cette vision facilite la prise de décision, étant donné que les optimisations ne sont pas locales, elle induit forcément une complexité au niveau des traitements, qui peut aboutir à une augmentation sensible du temps de calcul.
- Les aspects dynamiques ont été occultés. L'approche ne traite pas des problèmes liés à l'évolution simultanée des produits, ni aux régimes transitoires concernant les productions entre deux configurations. Une solution à envisager serait d'utiliser la simulation du modèle GAO, basé cette fois sur un formalisme RdP. Par exemple, l'étude du flux permettrait de considérer, puis de proposer des décisions de type déchargement progressif d'une ressource. La simulation pourrait aussi permettre d'identifier, lors des phases transitoires, lequel des produits, présents dans le SFPM, il est préférable de traiter en priorité.

Perspectives

L'avancement des études présentées dans ce mémoire a atteint la phase de développement informatique. Les travaux que nous menons actuellement concernent l'implantation logicielle. Sur la base des algorithmes présentés au chapitre VII, un prototype réalisé en Visual C++ a été développé (cf. annexes). Il permet de déterminer si un SFPM, modélisé par GAO, peut poursuivre une production donnée, lorsque des opérations viennent à tomber en panne. Il fournit le chemin le plus court.

Concernant la tolérance, le codage des algorithmes présentés en annexes est en cours. Il part de l'adaptation du noyau des algorithmes concernant la recherche d'existence de chemins. L'informatisation de la démarche d'obtention du modèle reste une priorité à court terme. A l'issue de ces développements, il sera possible de valider entièrement notre approche sur des cas réels.

A plus long terme, les travaux prospectifs se dégageant des études présentées dans ce mémoire s'orientent autour de trois axes : l'intégration, la tolérance et le recouvrement.

La supervision et plus particulièrement le recouvrement permettent de prendre en compte de façon plus intégrée des objectifs relatifs à la sûreté de fonctionnement et à la gestion de production. Il faut maintenant poursuivre cette intégration en considérant toutes les phases de la conception à l'exploitation. Il conviendra notamment de préciser comment sont mis en oeuvre les modules opérationnels et de modéliser les temps de réponse lorsqu'une négociation est demandée entre deux modules.

Les opérations, de par la nature des informations qu'elles modélisent, peuvent être vues comme des éléments de base pouvant être utilisés pour l'élaboration de différents modèles. Elles contribuent donc à l'ingénierie concourante. L'intégration devra être poursuivie en s'inspirant des outils relatifs aux systèmes d'informations et faisant plus généralement référence aux aspects développés autour du concept de référentiel. Ces développements doivent aboutir, entre autres, à une unicité des données.

Concernant la tolérance, il convient tout d'abord de poursuivre la définition des critères en s'axant sur l'aspect stochastique comme mentionné en conclusion de la partie B. L'étude de la pertinence de tels critères, résultant d'une analyse a posteriori d'architectures devrait aboutir à des mesures objectives utilisables dans des analyses multi-critères réalisées en conception. Il conviendra aussi de comparer les mesures obtenues pour la tolérance avec celles proposées

pour les différents types de flexibilité. L'objectif sera de déterminer les seuils de flexibilités à ajouter à un système très performant en productivité instantanée, de façon à augmenter sa productivité moyenne, compte tenu de certains types de pannes.

Par ailleurs, l'évaluation récursive des éléments sensibles, esquissée au chapitre IV, doit être poursuivie. Les résultats aboutiront à une quantification de la criticité autre que le degré de criticité, qu'il conviendra d'interpréter, puis de prendre en compte dans de futures procédures de recouvrement.

Différentes directions sont à étudier afin d'améliorer la procédure de recherche de configuration. Une meilleure réactivité sera obtenue en faisant intervenir la fonction de recouvrement beaucoup plus tôt dans le processus de détection. Actuellement, la procédure de recherche de configuration considère le cas des défaillances complètes. Des évolutions pourraient prendre en compte les défaillances progressives affectant les ressources, mais dont l'effet pourra très bien être détecté au niveau des produits.

Les prises de décision du recouvrement se fondent sur des stratégies, qu'il convient d'affiner. Il faudra notamment prendre en compte les politiques de maintenance. Puisqu'il est envisagé de faire fonctionner le SFPM pendant la réparation des ressources en panne, des notions relatives à la sécurité, comme l'espace d'intervention sont à considérer. Par exemple, quand le système fonctionne, il peut être impossible de demander une intervention humaine, car une partie de l'espace proche de la ressource en panne est susceptible d'être balayé par les bras de robots voisins. La ressource ne pourra être réparée que si les ressources à proximité sont dans un état déterminé.

Comme il a été précisé précédemment, le recouvrement présenté est centralisé. L'évolution probable des systèmes ira vers des architectures distribuées capables d'accueillir des contraintes dynamiques. Il sera donc nécessaire d'envisager des prises de décision décentralisées, utilisant ou non le GAO. Ce dernier cas nécessitera d'étudier les réductions possibles d'un graphe (composantes connexes, etc...) afin d'obtenir une vision, selon différents niveaux d'abstraction, du GAO.

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- [AFE 90] P. AFENTAKIS, R.A. MILLEN, M.M. SALOMON, "Dynamic layout strategies for flexible manufacturing systems", International Journal of Production Research, Vol. 28, 1990, pp. 311-323.
- [AFN 91] AFNOR, "Organisation et gestion de la production industrielle Concepts fondamentaux de la gestion de production", Norme NF X 50-310, décembre 1991.
- [AHO 89] A. AHO, J HOPCROFT, J ULLMAN, "Structures de données et algorithmes", Addison-Wesley Europe, 1989.
- [ALA 86] P. ALANCHE, P. SALVI, G. MOREL, M. ROESCH, P. LHOSTE, M. SALIM, "Modélisation de la Partie Opérative et Applications à la structuration de la commande des systèmes automatisés", Journées AFCET: Méthodes et Outils Modernes de conception et d'exploitation de la commande des procédés discontinus complexes, Montpellier, mars 1986.
- [AMA 94] S. AMAR, "Systèmes automatisés et flexibles de production manufacturière : Méthodologie de conception du système de coordination par prototypage orienté objet de la partie procédé", Thèse de doctorat, Université des Sciences et Technologies de Lille, Avril 1994.
- [AMI 88] ESPRIT Consortium AMICE, "Open System Architecture for CIM research", Reports, ESPRIT Project 688, Springer Verlag, Berlin, 1988.
- [AMI 92] ESPRIT Consortium AMICE, "Architecture description", Report, ESPRIT Project 5288, Brussels, 1992.
- [AMI 93] ESPRIT Consortium AMICE, "CIMOSA: Open System Architecture for CIM", 2nd revised and extended edition, Springer Verlag, 1993.
- [AUS 94] C. AUSFELDER, "Contribution à la conception d'un système de conduite pour les systèmes flexibles de production manufacturière: modélisation et validation de la comande", Thèse de doctorat, Université des Sciences et Technologies de Lille, Mars 1994.
- [BAR 92] F. BARBIER, P. JAULENT, "Techniques orientées objet et CIM", Ed. Eyrolles, 1992.
- [BAR 96] P. BARDELLI, "Le Modèle de Production Flexible", PUF 1996.
- [BAY 93] M. BAYART, M. STAROSWIECKI, "A generic functional model of smart instruments for distributed architecture", IMEKO TC-4, Bruxelles, may 1993.
- [BER 95] C. BERARD, L. PUN, B. ARCHIMEDE, "FMS Planning and Control Analysis and Design", Flexible Manufacturing Systems: Recent Developments, Elsevier Science (A. Raouf & M. Ben-Daya ed.), 1995, pp. 197-252.
- [BER 96] P. BERRUET, F. LY, "Terminologie et Approche fonctionnelle de la Supervision", Note interne LAIL-France, NI/96/3, Septembre 1996.
- [BER 97/a] P. BERRUET, A.K.A. TOGUYENI, S. ELKHATTABI, E. CRAYE, "A process modelling for Supervision in FMS: Operational Accessibility Graph", CACSD'97-IFAC, Gent, April 1997, pp. 225-230.
- [BER 97/b] P. BERRUET, A.K.A. TOGUYENI, S. ELKHATTABI, E. CRAYE, "Characterisation of Tolerance in FMS", 15th IMACS World Congress, Berlin, August 1997, Vol. 5, pp. 409-414.

- [BER 97/c] P. BERRUET, A.K.A. TOGUYENI, S. ELKHATTABI, E. CRAYE, "Tolerance in FMS: a way to improve design", SMC'97, Orlando, October 1997, Vol. 2, pp. 1814-1819.
- [BER 97/d] P. BERRUET, A.K.A. TOGUYENI, S. ELKHATTABI, E. CRAYE, "Modélisation d'un Système Flexible de Production Manufacturière pour l'évaluation de sa tolérance et le recouvrement de ses défaillances", Colloque de Recherche Doctorale AGIS'97, Communications régulières, Angers, décembre 1997, pp. 215-222.
- [BER 98/a] P. BERRUET, A.K.A. TOGUYENI, S. ELKHATTABI, E. CRAYE, "Tolerance evaluation criteria for Flexible Manufacturing Architectures", CESA'98, Hammamet, Tunisia, April 1998, Vol. 3, pp. 1-6.
- [BER 98/b] P. BERRUET, A.K.A. TOGUYENI, S. ELKHATTABI, E. CRAYE, "Toward an implementation of Recovery procedures for FMS Supervision", INCOM'98, Nancy, June 1998, organised session, Vol 3, pp. 371-376.
- [BER 98/c] P. BERRUET, A.K.A. TOGUYENI, S. ELKHATTABI, E. CRAYE, "Using Tolerance results to improve Reconfiguration process in FMS", SMC'98, San Diego, October 1998, Vol. 3, pp. 2309-2314.
- [BER 98/d] P. BERRUET, A.K.A. TOGUYENI, S. ELKHATTABI, E. CRAYE, "Tolerance evaluation of flexible manufacturing architectures", J. of Intelligent Manufacturing, December 1998, (accepté, à paraître fin 98)
- [BIG 97] M. BIGAND, J.P. BOUREY, D. COORBEEL, "The Design of Flexible Manufacturing Systems by Using a Knowledge Based System", 15th IMACS World Congress, Berlin, August 1997, Vol. 5, pp. 541-546.
- [BIG 98] M. BIGAND, D. COORBEEL, J.P. BOUREY, "Integration of view points by using an object oriented approach", IFAC-INCOM'98, Nancy, June 1998, Vol. 2, pp. 523-528.
- [BIL 94] P. BILAND, "Modélisation des modes de marche d'un système automatisé de production", Thèse de doctorat, Ecole Centrale de Nantes, février 1994.
- [BIR 69] Z.W. BIRNBAUM, "On the Importance of Different Components in a Multicomponent System", Multivariate Analyses (P.R. Krishnaiah ed.), Academic Press, 1969.
- [BOI 91] S. BOIS, "Intégration de la gestion des modes de marche dans le pilotage d'un système automatisé de production", Thèse de doctorat, Université des Sciences et Technologies de Lille, novembre 1991.
- [BON 87] R. BONETTO, "Les Ateliers Flexibles de Production", ed. Hermes, 2^{ème} édition, 1987.
- [BON 93] A. de BONNEVAL, "Mécanismes de reprise dans les systèmes de commande à événements discrets", Thèse de doctorat, Université Paul Sabatier, Toulouse, septembre 1993.
- [BON 96] J.L. BON, J. COLLET, "L'utilisation des diagrammes de décision binaire pour le calcul de fiabilité", Journal Européen des Systèmes Automatisés, 1996, Vol. 30, N° 8, pp. 1103-1114.

- [BOU 93] J.P. BOUREY, "Méthode de conception de la commande des systèmes flexibles de production manufacturiers", Habilitation à Diriger des Recherches, Université des Sciences et Technologies de Lille, février 1993.
- [BOU 97] A. BOURAS, "Contribution à la conception d'architectures réparties : modèles génériques et interopérabilité d'instruments intelligents", Thèse de doctorat, Université des Sciences et Technologies de Lille, 1997.
- [BRA 94] B.A. BRANDIN, W.M. WONHAM "Supervisory control of timed discrete event systems", IEEE Trans. on Automatic Control, 1994, Vol. 2,N° 39, pp. 329-342.
- [BRA 96] B. BRANDIN, "The Real-Time Supervisory Control of an Experimental Manufacturing Cell", IEEE trans. On Robotics and Automation, 1996, Vol. 12, N° 1, pp. 1-14.
- [BRI 89] P.H. BRILL, M. MANDELBAUM, 'On measures of flexibility in manufacturing systems", International Journal of Production Research, 27, 1989, pp. 747-756.
- [BRO 84] J. BROWN, D. DOBOIS, K. RATHMILL, S.P. SETHI, K. STECKE, "Classification of flexible manufacturing systems", The FMS Magazine, N° 2, 1984, pp. 114-117.
- [BRO 85] J. BROWN, K.E. STECKE "Variation in flexible manufacturing systems according to relevant types of automated material handing." Material Flow 2, 1985, pp. 179-185.
- [BUZ 82] J.A. BUZACOTT, "The fundamental principles of flexibility in manufacturing systems", 1st International Conference on Flexible Manufacturing Systems, Brighton, UK, 1982, pp. 13-22.
- [CAM 97] H. CAMUS, "Conduite des Systèmes Flexibles de Production Manufacturière par composition des régimes permanents cycliques : modélisation et évaluation de performance à l'aide des Réseaux de Petri", Thèse de doctorat, Université des Sciences et Technologies de Lille, mai 1997.
- [CAS 94] J.P. CASSAR, "Analyse et surveillance des processus complexes", Habilitation à Diriger des Recherches, Université des Sciences et Technologies de Lille, 11 mai 1994.
- [CHA 94] J.K. CHAAR, R.A. WOLZ, E.S. DAVIDSON, "Efficient and dependable manufacturing a software perspective", Computer control of flexible manufacturing systems, Chapman &Hall (S.J. Joshi & J.S. Smith ed.), 1994, pp. 343-378.
- [CHA 95/a] F. CHARBONNIER, H. ALLA, R. DAVID, "On the supervised control of discrete event systems", IEEE TCST, September 1995.
- [CHA 95/b] F. CHARBONNIER, H. ALLA, R. DAVID, "The Supervised Control of Discrete Event Dynamic Systems: A New Approach", In: *IEEE*, 34th Conference on Decision & Control, New Orleans, Dec. 1995, pp. 913-920.
- [CHA 95/c] A. CHAILLET-SUBIAS, "Approche multi modèles pour la commande et la surveillance en temps réel des systèmes à événements discrêts", Thèse de doctorat, Université Paul Sabatier de Toulouse, décembre 1995.
- [CHA 96] F. CHARBONNIER, "Commande supervisée des sytèmes à événements discrèts", Thèse de doctorat, Institut National Polytechnique de Grenoble, janvier 1996.

- [COM 91] M. COMBACAU, "Commande et surveillance des systèmes à événements discrêts complexes : application aux ateliers flexibles", Thèse de doctorat, Université Paul Sabatier de Toulouse, décembre 1991.
- [CON 96] S. CONTINI, G. de COLA, "A top down approach to fault tree analysis using Binary Decision Diagrams", Journal Européen des Systèmes Automatisés, 1996, Vol. 30, N° 8, pp. 1115-1130.
- [CRA 89] E. CRAYE, "De la modélisation à l'implantation automatisée de la commande hiérarchisée de cellules de production flexibles dans l'industrie manufacturière", Thèse de doctorat, Université des sciences et technologies de Lille, janvier 1989.
- [CRA 94] E. CRAYE, "Contribution au Controle/Commande des Systèmes Flexibles de Production Manufacturière", Habilitation à Diriger des Recherches, Université des Sciences et Technologies de Lille, 7 décembre 1994.
- [CRU 91] D. CRUETTE "Méthodologie de conception des systèmes complexes à événements discrêts: Application à la conception et à la validation hiérarchisée de la commande de cellules flexibles de production dans l'industrie manufacturière", Thèse de doctorat, Université des Sciences et Technologies de Lille 1, février 1991.
- [DAN 95] O. DANIEL, "Les Réseaux de Petri Stochastiques pour l'évaluation des attributs de la sûreté de fonctionnement des systèmes manufacturiers", Thèse de doctorat, Institut National Polytechnique de Grenoble, 26 janvier 1995.
- [DAN 97] N. DANGOUMAU, "Commande et surveillance des systèmes à événements discrèts, approche par réseaux de Petri", Rapport de DEA, Ecole Centrale de Nantes, 1997.
- [DAV 92] R. DAVID, H. ALLA, "Du Grafcet aux Réseaux de Petri", Ed. Hermes, Paris, 1992.
- [DON 97] A. DONIAVI, A.R. MILEHAM, L.B. NEWNES, "Systems Modelling Methodologies in the Manufacturing Environment", 15th IMACS World Congress, Vol 5, Berlin, august 1997, pp. 373-378.
- [DOU 84] G. DOUMEINGTS, "Méthode GRAI: méthodes de conception des systèmes en productique", Thèse de doctorat, Université de Bordeaux I, novembre 1984.
- [DOU 90] G. DOUMEINGTS, "Méthodes pour concevoir et spécifier les systèmes de production", CIM90, Bordeaux, 1990, pp 89-103.
- [DOU 92] G. DOUMEINGTS, B. VALLESPIR, M. ZANETTIN et al., "GIM, GRAI integrated methodology: A methodology for designing CIM systems", rapport LAP/GRAI, Université de Bordeaux I, 1992.
- [ELK 93] S. EL KHATTABI "Intégration de la surveillance de bas niveau dans la conception des systèmes à événemants discrêts : application aux systèmes de production flexibles", Thèse de doctorat, Université des Sciences et Technologies de Lille, septembre 1993.
- [ELK 95] S. EL KHATTABI, E. CRAYE, J.C. GENTINA, "Supervision by the behaviour modelling" IEEE/SMC 1995, Inernationnal Conference on System, Man and Cybernetics, Vancouver, 1995, pp. 1416-1422.

- [ERE 97] J.F. EREAU, "Reseaux de Petri pour l'étude de la disponibilité opérationnelle des systèmes spatiaux en phase d'avant projet", Thèse de doctorat, Université Paul Sabatier de Toulouse, 26 novembre 1997.
- [FRA 96] P.M. Frank, "Analytical and Qualitative Model-based Fault Diagnosis A Survey and Some New Results", European Journal of Control, 1996, Vol. 2, pp. 6-28.
- [GEH 94] A.L. GEHIN, "Analyse fonctionnelle et modèle générique des capteurs intelligents : Application à la surveillance de l'anesthésie", Thèse de doctorat, Université des Sciences et Technologies de Lille, janvier 1994.
- [GEH 98] A.L. GEHIN, M. STAROSWIECKI, "Analysis of the three tank benchmark reconfigurability using generic component models", COSY, Mulhouse, April 1998.
- [GEN 96] L. GENEST, J.F. DOMENECH, "Evaluation of Job-shop scheduling heuristics in workshops suject to disturbances", CIMAT'96, pp. 9-13.
- [GOD 95] A. GODON, J.L. FERRIER, "L'atelier logiciel Petri Maker. Commande des systèmes par réseau de Petri", Revue d'automatique et de productique appliquées, 1995, Vol 8, N° 6, pp. 813-822.
- [GOD 96] A. GODON, "Contribution à la commande des systèmes à événements discrèts par réseaux de Petri", Thèse de doctorat, Université d'Angers, 1996.
- [GON 95] M. GONDRAN, M. MINOUX, "Graphes et algorithmes", Collection de la Direction des Etudes et Recherches d'Electricité de France, 3^{ème} édition, Ed. Eyrolles, 1995.
- [GOU 97] A. GOUIN, J.L. FERRIER, "La prise en compte du temps dans les modèles automates : différentes approches", Colloque de Recherche Doctorale AGIS'97, Communications par voie d'affiche, Angers, décembre 1997, pp. 85-97.
- [GRA 95] B. GRABOT, P. HUGET, "Reference Models for an object oriented Design of Production Activity Control Systems", In IEEE/ECLA/IFIP International Conference on Architecture and Design Methods for Balanced Automation Systems, BASYS'95, Vitoria, Brasil, 1995.
- [GUN 95] A. GUNASEKARAN, T. MARTIKAINEN, P. YLI-OLLI, "Flexible Manufacturing Systems: An Investigation For Research And Applications", Flexible Manufacturing Systems: Recent Developments, Elsevier (A. Raouf, M. Ben-Daya ed.), 1995, pp. 3-44.
- [GUP 89] Y.P. GUPTA, A. GOYAL, "Flexibility of manufacturing systems: Concepts and measurements", European Journal of Operational Resarch, 43, 1989, pp. 119-135.
- [GUP 93] T. GUPTA, "Design of manufacturing cells for flexible environment considering alternative routeing", International Journal of Production Research, vol 31, n° 6, 1993, pp. 1259-1273.
- [HAM 91] S. HAMMADI, "Une méthode d'ordonnancement minimisant les temps d'attente et de transit dans les systèmes de production flexibles de type JOB-SHOP", Thèse de doctorat, Université des Sciences et Technologies de Lille, 1991.
- [HAN 96] R. HANNAM, "Computer Integrated Manufacturing: from concepts to realisation", Addison Wesley, 1996.

- [HAR 65] J. HARTMANIS, P.M. LEWIS II, R.E. STERN, "Hierarchies of memory limited computations", 6th annual IEEE, Symp. on Switching Circuit Theory and Logical Design, 1965, pp. 179-190.
- [HAR 73] J. HARRINGTON, "Computer Integrated Manufacturing", Huntington NY (R.E. Kreiger ed.), 1973.
- [HAR 90] L. HARRIS, "Mind over manufacturing", Al. Expert, Nov 1990.
- [HOP 79] J.E. HOPCROFT, J.D. ULLMAN, "Introduction to Automata Theory, Languages, and Computation", Addison-Wesley Series in Computer Science, 1979.
- [HUG 96] P. HUGET, B. GRABOT, "Specification of Production Activity Control Systems: Reference Models and Reuse of past Experiences", CESA'96 IMACS, Lille, France, July 1996, pp. 244-249.
- [HUT 84] G.K. HUTCHINSON, "Flexibility is a key to economic feasability of automating small batch manufacturing", Industrial Engineering 21, 1984, pp. 77-86.
- [HUV 94] B. HUVENOIT, "De la coneption à l'implantation de la commande modulaire et hiérarchisée de systèmes flexibles de production manufacturière", Thèse de doctorat, Université des Sciences et Technologies de Lille, octobre 1994.
- [KAU 75] A. KAUFMANN, "Modèles mathématiques pour l'étude de la fiabilité des systèmes", Ed. Masson, 1975.
- [KER 94] L. KERMAD, E. CRAYE, J.P.BOUREY, J.C. GENTINA, "The working and exploiting mode in FMS," IEEE/SMC, San Antonio, 1994, pp. 1521-1526.
- [KER 96] L. KERMAD "Contribution à la supervision et à la gestion des modes et des configurations des systèmes flexibles de production manufacturière", Thèse de doctorat, Université des Sciences et Technologies de Lille 1, janvier 1996.
- [KOR 98] O. KORBAA, "Commande cyclique des Systèmes Flexibles de Production Manufacturière à l'aide des Réseaux de Petri : De la planification à l'ordonnancement des régimes transitoires", Thèse de doctorat, Université des Sciences et Technologies de Lille, 9 juillet 1998.
- [KOS 98] K. KOSANKE, F. VERNADAT, "CIMOSA and GERAM: Standardisation in Enterprise Engineering", IFAC-INCOM'98, Vol. 1, Nancy, June 1998, pp. 115-125.
- [KUM 91] R. KUMAR, "Supervisory synthesis techniques for discrete event dymical systems", Thèse de doctorat, Université du Texas, 1991.
- [KUZ 86] A. KUSIAK, "Application of Operational Research models and techniques in flexible manufacturing systems", European Journal of Operational Research, Vol. 24, 1986, pp. 336-345.
- [LAM 97] M. LAMBERT, B. RIERA, G. MARTEL, C. LOUPPE, "Conception d'une interface de nouvelle génération pour la supervision d'un procédé de retraitement des combustibles nucléaires", Simulation des procédé et Automatique, Vol. 11, ed. Lavoisier, Paris, 1997, pp. 139-144.
- [LAP 95] J.C. LAPRIE and al., Guide de la sûreté de fonctionnement, Cépadues-Editions, Toulouse, mai 1995.

- [LAU 86] J.L. LAURIERE, "Intelligence Artificielle : résolution de problèmes par l'Homme et la machine", Ed. Eyrolles, 1986.
- [LEM 91] J.L. LE MOIGNE, "La modélisation des systèmes complexes", Dunod ed., Paris, 1991.
- [LES 94] J.J. LESAGE, "Contribution à la formalisation des modèles et méthodes de conception des systèmes de production", Habilitation à Diriger des Recherches, Université de Nancy1, février 1994.
- [LEV 94] A.H. LEVIS, D.M. PERDU, "A systems engineering approach to information architecture design", IFAC Symposium on Integrated Systems Engineering, Baden-Baden, 1994, pp. 131-144.
- [LEY 94] L. LEYVAL, S. GENTIL, S. FERAY-BEAUMONT, "Model-based Causual Reasoning for Process Supervision", Automatica, Vol. 30, N° 8, Elsevier Science, 1994, pp. 1295-1306.
- [LHO 91] P. LHOSTE, "Surveillance des M.S.A.P.: les Atouts de la Modélisation de Comportement", Journée Surveillance du Pôle SED (GT2) du GR Automatique, février 1991.
- [LHO 94] P. LHOSTE, "Contribution au génie informatique : concepts, modèles, méthodes et outils", Habilitation à Diriger des Recherches, Université de Nancy1, février 1994.
- [LIG 90] P. LIGNELET, "Strucutres de données avec Ada : conception orientée objets", Vol. 1 et 2, Techniques de l'informatique, Ed. Masson, 1990.
- [LY 97] F. LY, A.K.A. TOGUYENI, E. CRAYE, "Predictive Maintenance and Monitoring in Flexible Manufacturing Systems", 15th IMACS World Congress, Berlin, August 1997, Vol 5, pp. 415-420.
- [LY 98] F. LY, A.K.A. TOGUYENI, E. CRAYE, "A Detection approach applied to Production Flows deviation in Flexible Manufacturing Systems", CESA'98, Hammamet, Tunisia, April 1998, Vol. 3, pp. 95-99.
- [LYO 92] P. LYONNET, "La maintenance: mathématiques et méthodes", ed. TEC & DOC, 1992.
- [MAB 96] M. MABROUK, "Proposition d'une méthode et d'un outil d'aide à la Reconfiguration des Systèmes Automatisés de Production", Thèse de doctorat, Université de Valenciennes et du Hainaut-Cambrésis, mai 1996.
- [MAH 97] A.H. MAHDI, H. AMET, M.C. PORTMANN, "Agencement physique d'atelier avec minimisation des coûts de transport", Colloque de Recherche Doctorale AGIS'97, Communications régulières, Angers, décembre 1997, pp. 185-192.
- [MAL 95] M. MALHOTRA, K. TRIVEDI, "Power hierarchy of Dependability-Model Types", IEEE Trans. on Reliability, 1995, Vol. 43, N° 3, pp. 493-502.
- [MIL 88] P. MILLOT "Supervision des procédés automatisés et ergonomie." Traité des Nouvelles Technologies, Série Automatique, Ed Hermès, 1988.
- [MIL 96] P. MILLOT, "De la Surveillance à la Supervision : l'Intégration des Opérateurs Humains", Ecole d'été : Surveillance des Systèmes Continus, Grenoble, septembre 1996.

- [MIL 98] O. MILLON, M. PICAVET, M. LOMBARD, "Démarche de conception des systèmes d'information dans le cadre de la modélisation multi-points de vue des données techniques", IFORSID, Montpellier, 13-15 mai 1998.
- [MOR 93] G. MOREL, P. LHOSTE, "Outline for discrete part manufacturing engineering", 7th Annual European Computer Conference, IEEE/SEE, Paris, 1993, pp. 146-155.
- [MUR 89] T. MURATA, "Perti Nets: Properties, Analysis and Applications", IEEE Computer, Vol. 7, N° 4, 1989, pp. 541-580.
- [NAJ 94] M. NAJID, "Contribution au pilotage dynamique et en ligne d'une cellule flexible d'usinage", Thèse de doctorat, Université de Nantes, février 1994.
- [NIE 92] E. NIEL, A. JUTAR, "Contribution à la formalisation de la Sécurité Opérationnelle", Revue d'Automatique et de Productique Appliquée, Vol. 5, N° 2, 1992, pp. 57-64.
- [NIE 94] E. NIEL, "De la Sécurité Opérationnelle des Systèmes de Production", Habilitation à Diriger des Recherches, Université de Lyon I, décembre 1994.
- [NIE 96] E. NIEL, N. REZG, M. NOURELFATH, S. BOUKHOBZA, "Supervisory Control in the context of Operational Safety Reactivity", IMACS-IEEE SMC CESA'96, Lille, july 1996, pp. 746-751.
- [NOU 97] M. NOURELFATH, "Extension de la Théorie de la Supervision à la surveillance et à la Commande des Systèmes à Evénements Discrets : Application à la Sécurité Opérationnelle des Systèmes de Production", Thèse de doctorat, INSA de Lyon, juillet 1997.
- [OHL 94] H. OHL, E. CASTELAIN, J.C. GENTINA, "Synchrony Theory applied to control problems in Flexible Manufacturing Systems", IEEE-SMC'94, Vol. 2, San Antonio, october 1994, pp. 1689-1694.
- [PAG 80] A. PAGES, M. GONDRAN, "Fiabilité des systèmes", Collection de la Direction des Etudes et Recherches d'Electricité de France, Ed. Eyrolles 1980.
- [PAR 92] T. PARAYRE, "Le MESAP: vers une Méthodologie d'Exploitation des Systèmes Automatisés de Production", Thèse de doctorat, Université de Valenciennes et du Hainaut-Cambrésis, 1992.
- [PEL 92] C. PELLEGRIN, "Choice of a periodic on-condition maintenance policy", Internationnal Journal of Production Research, 30, 5, 1992, pp. 1153-1173.
- [PER 96] F. PERES, "Outils d'analyse de performance pour stratégies de maintenance dans les systèmes de production", Thèse de doctorat, Université de Bordeaux I, 1996.
- [PEY 69] B.G. PEYRET, "La fiabilité Industrielle : ses bases mathématiques", Ed. Eyrolles, 1969.
- [PUN 84] L. PUN, "Systèmes industriels d'Intelligence Artificielle Outils de Productique", Ed. Editest, 1984.
- [RAM 87] P.J. RAMADGE, W.M. WONHAM "Supervisory control of a class of discrete event processes", SIAM J. on Control and Optimization, Vol 1, 25, 1987, pp. 206-230.
- [RAM 89] P.J. RAMADGE, W.M. WONHAM, "The control of discrete envent systems", Proceedings IEEE, vol. 77, no 1, 1989, pp 81-98.

- [RAM 96] J.R. RAMIREZ, "Etude des modes de marche des systèmes automatisés de production pour la définition des stratégies de conduite", Thèse de doctorat, Université de Valenciennes et du Hainaut-Cambrésis, janvier 1996.
- [RAN 90] P. RANKY "Flexible Manufacturing Cells and Systems in CIM." CIMware Ltd, Guildford, U.K. 1990.
- [RAO 95] A. RAOUF, M. FAROOQ ANJUM, "Manufacturing Systems: Flexibility assessment", Flexible Manufacturing Systems: Recent Developments, Elsevier (A. Raouf & M. Ben-Daya ed.), 1995, pp. 69-84.
- [ROJ 95] J. ROJAS, Y. SALLEZ, R. SOENEN, "Aid to decision making for the reconfiguration of automated manufacturing systems", First World Congress on Intelligent Manufacturing Processes & Systems, Puerto Rico, 1995.
- [ROL 86] C. ROLLAND, "Introduction à la conception des systèmes d'information et panorama des méthodes disponibles", Revue génie logiciel, N° 4, ed. EC2, avril 1986.
- [SAH 87] A.E.K. SAHRAOUI "Contribution à la surveillance et à la commande d'ateliers", Thèse de doctorat, Université Paul Sabatier, Toulouse, 1987.
- [SAH 92] A.E.K. SAHRAOUI, "An approach for monitoring discrete event systems", AFCET APII, Vol. 26, N° 2, 1992, pp. 91-106.
- [SAS 97] C. SASSINE, Z. SIMEU-ABAZI, "ALOSURF for performance evaluation and maintenance integration in manufacturing systems", 2^{ème} Congrès Pluridisciplinaire en Qualité et Sûreté de Fonctionnement, mars 1997, pp. 73-80.
- [SAV 85] C.M. SAVAGE, "A Program Guide for CIM Implementation", Dearborn MI: Society of Manufacturing Engineers, 1985.
- [SCH 89] G. SCHMIDT, "CAM: Algorithmen und Decision Support für die Fertgungsplanung.", Springer-Verlag, Berlin, 1989.
- [SCH 96] W.G. SCHNEEWEISS, "Limited usefulness of BDDs for mean failure frequency calculation", Journal Européen des Systèmes Automatisés, 1996, Vol. 30, N° 8, pp. 1131-1136.
- [SER 89] P. SERAFINI, W. UKOVICH, "A mathematical model for periodic scheduling problems", SIAM J. Disc. Math., Vol 2, N° 4, 1989, pp. 550-581.
- [SET 90] A.K. SETHI, S.P. SETHI, "Flexibility in Manufacturing: A survey", The international Journal of Flexible Manufacturing Systems, Vol. 2, N° 4, 1990, pp. 289-328.
- [SFA 89] A SFALCIN, M. ROESCH, P. LHOSTE, G. MOREL, "Fiabilité, Disponibilité, et Sécurité des installations intégrant des filtres de comortement", 2éme colloque annuel du club FIABEX, INT, Evry, novembre 1989.
- [SHA 98] A.L. SHAW, "AIT Adavanced Information Technology for design and manufacture an industrial insight into technology development", IFAC-INCOM'98, Vol. 1, Nancy, June 1998, pp. 101-106.
- [SIM 95] F. SIMONOT-LION "La démarche de conception des systèmes d'automatisation", Journée d'étude SAPID, Paris, 30-31 mai 1995.
- [SIM 97] Z. SIMEU-ABAZI, O. DANIEL, "Méthode itérative pour l'évaluation de la sûreté de fonctionnement des systèmes de production", Colloque National de

- Z. SIMEU-ABAZI, O. DANIEL, "Méthode itérative pour l'évaluation de la sûreté de fonctionnement des systèmes de production", Colloque National de Faibilité et Maintenabilité λμ, octobre 1996, pp. 296-306.
- [SIM 98] Z. SIMEU-ABAZI, "Sur la Sûreté de Fonctionnement des systèmes de Production", Habilitation à Diriger des Recherches, Institut National Polytechnique de Grenoble, janvier 1998.
- [SIN 96] R.M. SINNAMON, J.D. ANDREWS, "Quantitative faults tree analysis using Binary Decision Diagrams", Journal Européen des Systèmes Automatisés, 1996, Vol. 30, N° 8, pp. 1051-1071.
- [STA 94] M. STAROSWIECKI, "La problématique et les approches de la surveillance des systèmes technologiques", journées d'études S³ (Sûreté, Surveillance, Supervision), Paris, 17 et 18 novembre 1994.
- [STA 95] M. STAROSWIECKI, M. BAYART, "Modes d'utilisation et modes de marche des instruments intelligents", journées d'études SAPID, Conception de Systèmes Automatisés de Production a Intelligence Distribuée, Paris, 30-31 mai 1995.
- [TAY 89] E. TAYMAZ, "Types of flexibility in a single-machine production system", International Journal of Production Research, 27, 1989, pp. 1891-1899.
- [TAW 95] R. TAWEGOUM "Contrôle Temps Réel du déroulement des opérations dans les systèmes de production flexibles", Thèse de doctorat, Université des Sciences et Technologies de Lille 1, avril 1995.
- [TOG 92] A.K.A TOGUYENI "Surveillance et diagnostic en ligne dans les ateliers flexibles de l'industrie manufacturière", Thèse de doctorat, Université des Sciences et Technologies de Lille 1, novembre 1992.
- [TOG 96/a] A.K.A. TOGUYENI, S. ELKHATTABI, E. CRAYE, "Functional and/or Structural approach for the Supervision of Flexible Manufacturing Systems", CESA'96 IMACS, 9-13 july 1996, Symp. on Discrete Event and Manufacturing Systems, pp. 716-721.
- [TOG 96/b] A.K.A. TOGUYENI, E. CRAYE, J.C. GENTINA,"A framework to design a distributed diagnosis in FMS", IEEE/SMC-1996, China, Oct 1996.
- [TUR 36] A. M. TURING, "On computable numbers with an application to the Entscheidungs problem", Proc. London Math. Soc., 1936, Vol. 2, pp. 230-265.
- [VER 93] F. VERNADAT, "CIMOSA: Enterprise Modelling and Enterprise Integration Using a Process-based Approach", In IFIP Transaction on Information Infrastructure Systems for Manufacturing, Amsterdam, 1993, pp 65-84.
- [VIL 88] A. Villemeur, "Sûreté de Fonctionnement des Systèmes Industriels", Ed. Eyrolles, 1988.
- [WAR 95] H.J. WARNECKE, R. STEINHILPER, H. STORN, "FMS-Planning Since the Early Eighties Experiences, Recommendations and Future Tedencies", Flexible Manufacturing Systems: Recent Developments, Elsevier (A. Raouf, M. Ben-Daya ed.), 1995, pp. 45-66.
- [WIL 92] T.J. WILLIAMS, "The Purdue Enterprise Reference Architecture", Instrument Society of America, Research Triangle Park, North Carolina, USA, 1992.

- [WIL 94] T.J. WILLIAMS, J.P. SHEWCHUK, C.L. MOODIE, "The role of CIM architectures in flexible manufacturing systems", Computer control of flexible manufacturing systems, Chapman & Hall (S.J. Joshi & J.S. Smith ed.), 1994, pp. 1-30.
- [WON 87] W.M. WONHAM, P.J. RAMADGE, "On the Supremal Controllable Sublanguage of a Given Language", SIAM J. Control and Optimization, Vol. 25, N° 3, 1987, pp 637-659.
- [ZAM 97] E. ZAMAI, "Architecture de Surveillance-Commande pour les Systèmes à Evénements Discrêt Complexes", Thèse de doctorat, Université Paul Sabatier de Toulouse, septembre 1997.
- [ZAY 97] J. ZAYTOON, "Contribution à l'Ingénierie Intégrée des Systèmes Automatisés", Habitlitation à Diriger des Recherches, Université de Reims Champagne Ardenne, janvier 1997.
- [ZHO 89] M.C.ZHOU, F. DI CESARE, "Adaptative design Petri Net Controllers for Error Recovery in Automated Manufacturing Systems", IEEE trans. on System, Man and Cybernetics, Vol. 19, N° 5, 1989, pp. 963-973.
- [ZHO 90] H. ZHONG, W.M. WONHAM, "On consistency of Hierarchical Supervision of Discrete Event Systems", IEEE trans. On Automatic Control, Vol. 35, N° 10, 1990, pp. 1125-1134.
- [ZWI 95] G. ZWINGELSTEIN, "Diagnostic des défaillances : théorie et pratique pour les systèmes industriels", Traité des Nouvelles Technologies, Ed Hermes, 1995.

ANNEXES

Méthodologies CIM

Les méthodologies CIM ont pour objet de traiter, de la spécification à la réalisation, un ou plusieurs aspects du système (informationnel, décisionnel, opérationnel) en combinant différentes méthodes et formalismes. Pour cela, elles peuvent s'appuyer sur des architectures CIM.

Une architecture CIM comprend un ensemble de modèles qui représentent les différents aspects d'un système CIM [DOU 90]. L'architecture peut être vue comme un cadre pour la conception, l'analyse et l'implantation des systèmes manufacturiers complexes, et fournit des modèles qui pourront être utilisés pour ces objectifs. L'utilisation d'une architecture de référence aide grandement le projet d'automatisation. Elle va permettre d'appliquer la méthodologie et de vérifier le bon déroulement du projet [WIL 94].

On trouve deux types de méthodologies :

- Celles qui s'intéressent au développement et à la mise en oeuvre d'un projet global comme un programme de production, d'intégration ou de développement ;
- Celles qui s'intéressent au système opérationnel avec un souci d'intégration des points de vue, comme la commande, le contrôle, la maintenance, la gestion du SFPM.

Toutes ces méthodologies n'ont pas pour objectif de décrire un système avec une seule méthode. Des travaux portent sur l'utilisation de plusieurs méthodes (SADT, réseaux de Petri, MERISE, objet, ...) dans le cadre d'une méthodologie. Nous pouvons, citer par exemple, l'adaptation des méthodes fonctionnelles (SADT, SA-RT, ...) et objet (HOOD, OMT, ...) issues du génie logiciel à l'ingénierie des SFPM [ZAY 97].

1. Approches de type global

Ces approches adoptent une démarche plutôt descendante dans ce sens qu'elles partent de fonctions stratégiques (de gestion globale) pour élaborer des décisions plus tactiques et s'intéresser à l'aspect opérationnel. On recense trois principales méthodologies de ce type.

La méthodologie intégrée **GRAI**, développée au laboratoire GRAI de Bordeaux surtout depuis 1984 [DOU 84], consiste en un modèle de référence, un contexte de modélisation (cf. Figure A-1) et une approche structurée. Le modèle de référence décrit les sous-systèmes (décisionnels, informationnels et physiques), leurs comportements et leurs interactions. Pour

chacun des sous-systèmes, aura auparavant été spécifié, en fonction du contexte de modélisation, ce qui doit être fait, qui le fait, comment, quand et où le faire. L'approche est descendante et couvre le cycle de vie du système. A partir des objectifs, les réponses à chacunes des cinq questions ci-dessus sont d'abord déterminées selon les points de vue utilisateur, ce qui donne lieu à une série de modèles. Puis ces modèles sont transformés pour intégrer les points de vue techniques [DOU 92].

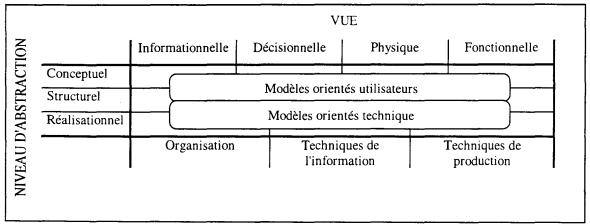


Figure A-1 : Le contexte de modélisation GRAI

La méthodologie **Purdue**, développée à l'université Purdue (USA) depuis 1989, est basée sur l'architecture de référence de l'entreprise, le modèle de référence, et un ensemble de procédures. L'architecture de référence couvre toutes les tâches d'une entreprise. Dans un but de mise en oeuvre, les activités (information et service) sont classées selon d'une part le degré d'automatisation et la séparation des fonctionnalités d'autre part. Le modèle de référence présente le moyen de spécifier les tâches à automatiser et leur mise en oeuvre. Le cycle de vie de l'entreprise est ici aussi considéré à travers les procédures de mise en oeuvre en spécifiant les différentes étapes qui doivent être suivies [WIL 92].

La méthodologie CIMOSA est développée, depuis 1984, dans le cadre de projets européens ESPRIT par le consortium AMICE [AMI 88]. L'architecture est fondée sur le cube CIMOSA (cf. Figure A-2), qui spécifie les modèles selon trois axes : le niveau de modélisation (définition des besoins, spécification de conception et description de mise en oeuvre), le niveau de détail de la solution (générique, partiel, spécialisé) et le type de vue (fonctionnel, informationnel, point de vue ressource et organisationnel). Ils font respectivement appel à trois processus : l'instantiation, la dérivation et la génération. La méthodologie est fondée sur le principe de trois niveaux d'intégration : intégration du système physique, intégration de l'application et intégration du processus commercial. Pratiquement, l'approche est descendante selon le cycle de vie du système. Les besoins de l'entreprise sont

tout d'a ord énoncés dans un modèle de définition des besoins. A partir de là, le modèle de spécification fonctionnelle est construit en utilisant les contraintes spécifiques à une partie de l'entreprise. Puis un modèle de description de l'implémentation est développé. Tous ces modèles utilisent un ensemble de méthodes et d'outils d'aide à la création. On obtient ainsi une infrastructure intégrante servant à interconnecter les différents composants logiciels d'un système CIM [AMI 92], [AMI 93].

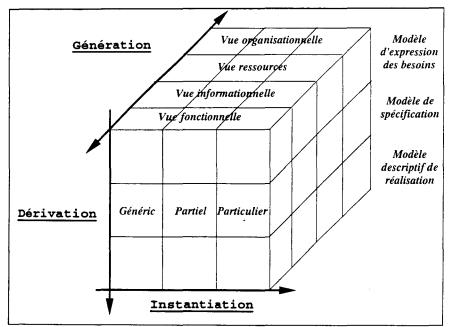


Figure A-2: Le cube CIMOSA

Une comparaison de ces méthodes est résumée par Kosanke et Vernadat [KOS 98].

2. Approches de type exécutif

Ce type d'approche est systémique orienté vers les fonctions plutôt exécutives de l'entreprise.

De nombreux travaux à propos des méthodologies CIM ont été réalisés à partir de cette approche. Ils ont abouti à la définition de méthodes et de hiérarchies de représentation des fonctions de l'entreprise. Nous citons quelques exemples.

ICAM (Integrated Computer Aided Manufacturing) est un projet développé par l'USAF (United States Air Force) qui a donné lieu à la définition de IDEF (Icam DEFinition) [SAV 85]. Différentes méthodes (IDEF0 à IDEF4) ont ensuite été développées, chacune se focalisant sur un point particulier du système. Par exemple, IDEF0 et IDEF1 décrivent respectivement les fonctions et les données circulant au sein du système. Dans le modèle obtenu, les activités d'un niveau sont explicitées par des activités de niveau inférieur. Une

hiérarchie des activités est ainsi obtenue. IDEF2 s'intéresse au comportement dynamique. IDEF3 et IDEF utilisent pour la conception du procédé et dans le cas d'approches objet [DON 97].

Le modèle **CAM.I** (Computer Aided Manufacturing International) décompose l'entreprise en quatre niveaux. Deux niveaux seulement (atelier et cellule) ont été détaillés.

Le modèle présenté par le NIST (National Institute of Standards and Technology) permet de représenter un système de production en cinq niveaux (cf. Figure A-3). Chaque niveau correspond à un niveau d'abstraction, donc de détail et à une partie de l'entreprise [BAR 92]. Le niveau 0 (machine) est le niveau le plus élémentaire, non décomposable. Le niveau 1 est appelé cellule et intègre un certain nombre de machines. Il englobe la commande (numérique) des machines. Le niveau 2 correspond à celui de la supervision. Ici, le terme supervision fait référence aux séquences des tâches (gestion des priorités, déclenchement) et au suivi du déroulement des opérations. Ces trois premiers niveaux forment ce que l'on appelle un atelier flexible. Le niveau 3 fait référence à l'optimisation de la production. Il correspond à l'intégration complète de l'atelier. Le niveau 4 intervient au sein de l'entreprise entière, prenant en compte des implantations multi-sites. Ce modèle est très utilisé si bien qu'il est couramment nommé "pyramide CIM".

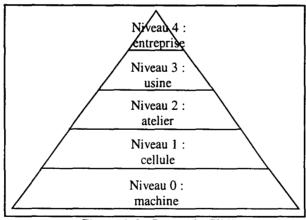


Figure A-3: Pyramide CIM

D'autres travaux visent à reporter certains niveaux de cette "pyramide CIM" sur des éléments de type capteurs/actionneurs. Il s'ensuit une distribution de l'intelligence sur les équipements de niveaux bas. L'équipe ASPIC (Analyse et Surveillance des Processus Industriels Complexes) du LAIL, qui prend pour cadre les procédés continus, travaille dans ce sens [BAY 93], [GEH 94], [STA 95]. L'objectif est de contribuer à la sécurité de l'installation et à la maintenance préventive.

Le Projet CASPAIM

Cette section développe la méthodologie CASPAIM, thème fédérateur des travaux actuels de l'équipe PFM du LAIL.

1. Genèse, présentation générale

La méthodologie CASPAIM (Conception Assistée des Systèmes de Production Automatisés de l'Industrie Manufacturière) a débuté dans les années 80. Le projet vise à définir une méthodologie de conception concernant l'activité de production de façon à aboutir à une organisation des modélisations et une implantation universelles. Dans ce sens, il s'inscrit dans une démarche intégrée de type exécutif et ne se contente pas d'interfacer des entités indépendantes (îlots d'automatisation).

Initialement, ce projet couvrait uniquement l'aspect commande en utilisant principalement le formalisme réseau de Petri (RdP) [MUR 89]. L'objectif était d'automatiser ou d'assister le processus complet de conception d'un système de commande performant, depuis la définition du cahier des charges jusqu'à son implantation. Ce processus a été rendu interactif, avec de nombreuses étapes de validation, afin de s'affranchir de sa relative complexité (cf. Figure A-1)

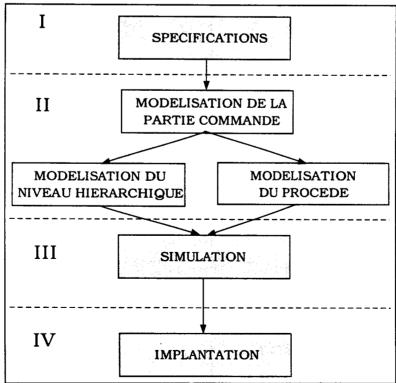


Figure A-1: Schéma directeur de CASPAIM I

Il s'est ensuite orienté vers la conception des autres composantes du SFPM. L'approche systémique, orientée par les données, englobe maintenant de nombreux points de vue tels que la conception du produit, la définition de la commande, l'exploitation sûre, ...

Ce projet a évolué selon deux phases. La première phase a permis d'élaborer des concepts de structuration en modélisation permettant d'appréhender une certaine complexité des SFPM (paramétrisation du système de production, du système de commande). Le SFPM a été décomposé en partie procédé, partie commande et niveau hiérarchique (cf. Figure A-2) [CRA 89].

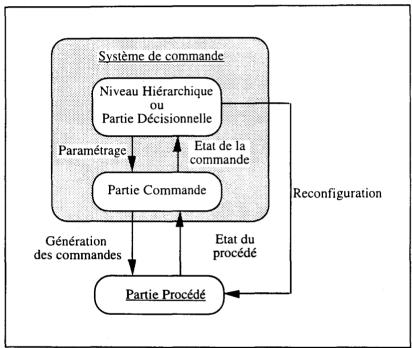


Figure A-2: Décomposition d'un système de production dans CASPAIM I

Les principales limites sont venues d'une caractérisation insuffisante du procédé au niveau partie opérative et produits (comme le typage et l'état d'avancement de la gamme). Cette nouvelle caractérisation des produits a entraîné une nouvelle démarche de description de la partie commande et a abouti, à partir de l'année 90, à la deuxième phase du projet.

La décomposition initiale (cf. Figure A-2) est conservée. Mais la partie commande est elle même scindée en Suivi des Gammes Opératoires et Gestionnaire de Ressources (Figure A-3). Les différentes fonctions de la partie commande ont été réparties entre ces deux modules. Le Suivi des Gammes Opératoires est chargé d'assurer le contrôle du séquencement des tâches au niveau de chaque gamme de fabrication considérée isolement. Le Gestionnaire de Ressources gère effectivement la commande des moyens de production.

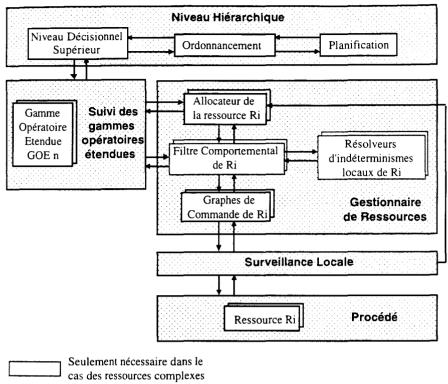


Figure A-3: Architecture de contrôle d'un SFPM selon CASPAIM [CRA 94]

Des modules de surveillance, de gestion des modes ont ensuite été intégrés à cette commande.

2. Démarche de conception de la commande

L'approche selon des objectifs systèmes d'une part et produits d'autre part a permis d'aborder le SFPM non plus seulement selon le point de vue fonctionnel, mais aussi selon le point de vue opérationnel, c'est à dire en analysant et intégrant la structure, les caractéristiques et les contraintes liées aux différents moyens de production, que nous nommerons ressources.

Les principes de la démarche CASPAIM II sont présentés par la Figure A-4.

2.1 Phase de spécification

Spécification de la partie logique: Les produits à fabriquer par le SFPM sont décrits par leur gamme logique [CRU 91], sans tenir compte de la nature des équipements à utiliser. Une gamme logique d'un produit représente la séquence des différentes fonctions de transformation (usinage, assemblage) que le SFPM doit réaliser, afin d'obtenir le produit fini à partir de son état brut. La flexibilité de gamme est prise en compte à ce niveau.

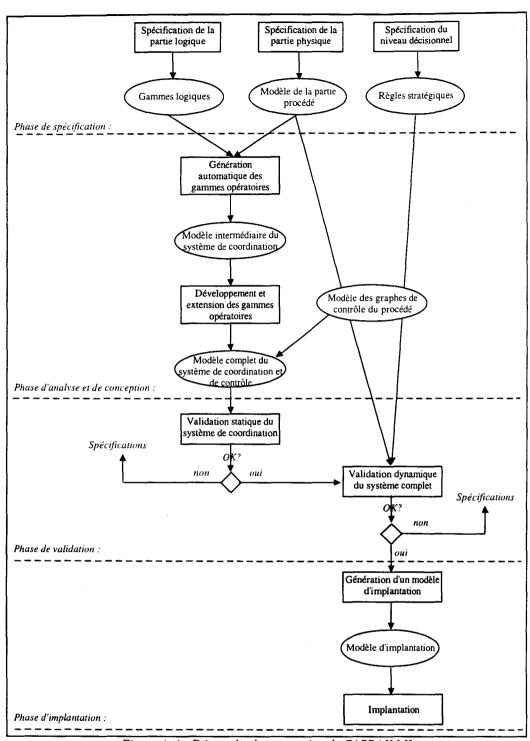


Figure A-4: Démarche de conception de CASPAIM II.

Spécification de la partie physique: Les différentes ressources de production (transformation, transport, stockage, ...) sont décrites ainsi que leur organisation en terme d'agencement, d'accessibilité et de contraintes.

Spécification de la partie décisionnelle: Cette étape aboutit à la définition de règles stratégiques qui permettront de résoudre les conflits et indéterminismes d'affectation [OHL 94], [CAM 97], et de routage [HAM 91], [TAW 95].

2.2 Phase d'analyse et de conception

La Partie Commande détaillée Figure A-3 est structurée selon la Figure A-5 :

- Les graphes de commande (niveau 1) décrivent, pour chaque ressource, le processus de commande implanté sur chaque unité de production.
- Le niveau coordination des opérations (niveau 2) gère l'avancement des produits dans leurs gammes opératoires respectives. Une gamme opératoire est représentée grâce au formalisme RdP, et décrit, pour un type de produit, la séquence des opérations qu'il doit subir. Ce module génère des requêtes d'allocation de ressources de façon à activer les graphes de commande adéquats.
- Le niveau 3 a pour objet de résoudre les indéterminismes du niveau 2.

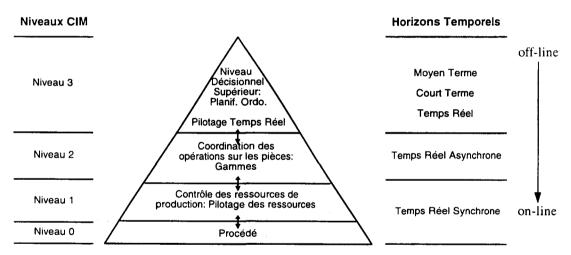


Figure A-5 : Hiérarchisation de la commande

Génération automatique des gammes opératoires : Les gammes logiques sont étendues en tenant compte des ressources de transformation et de l'aspect transitique de la partie physique [AMA 94]. Ces gammes opératoires constituent un modèle pour la partie coordination de la commande. Elles sont non déterministes car elles prennent en compte les flexibilités de gamme, de ressource, et d'architecture.

Construction des graphes de commande: Pour chaque type de ressource, simple ou complexe (par exemple un convoyeur), sont élaborées des séquences d'actions élémentaires de commande à partir d'une bibliothèque de graphes partiels [HUV 94]. Pour chaque ressource

complexe, sujette aux indéterminismes, un filtre comportemental permet, en plus, de garantir la cohérence des sollicitations des différentes composantes du graphe, compte tenu de l'état global de la ressource.

2.3 Phase de validation

La validation qualitative, dans CASPAIM, repose sur deux démarches : une validation statique des gammes et une validation dynamique du système.

La validation statique est fondée sur l'analyse de "bonnes propriétés" du modèle RdP (vivacité, RdP borné, ...). Elle vise également à rechercher les blocages liés à une saturation du système de transport [AUS 94] ou résultant d'étreintes fatales liées à une utilisation croisée des ressources [CRU 91].

La validation dynamique utilise une démarche de simulation [AUS 94]. Elle permet une analyse globale du modèle.

Une analyse des performances du SFPM permet de vérifier les spécifications quantitatives du point de vue capacité de production.

2.4 Phase d'implantation

Concernant la commande, l'implantation est basée sur une transposition des modèles en langage ADA [HUV 94]. Les autres modules venant se greffer à la commande font l'objet d'implantations spécifiques [TOG 92], [ELK 93], [BOI 91], [KER 96]. La structure complète de la commande est représentée Figure A-6.

Le Niveau Décisionnel Supérieur prend en compte la planification et l'ordonnancement. Il gère les différentes gammes opératoires qui vont solliciter les gestionnaires de ressources. Ces derniers intègrent ou non un filtre comportemental selon le type de ressource. Des modules de surveillance locale [ELK 93] s'insèrent entre les graphes de commande et les ressources.

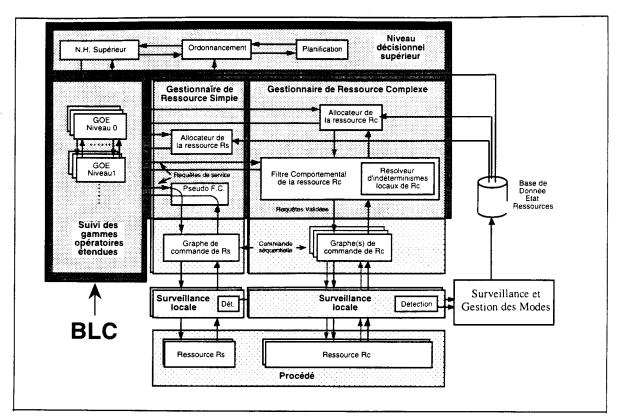


Figure A-6: Structure du contrôle / commande

3. Modules additionnels

Des modules de surveillance, de gestion des modes et d'ordonnancement sont greffés à cette commande.

3.1 La surveillance

L'étape de spécification de la surveillance permet de préciser les éléments à surveiller. Leurs seuils de dégradation et de dysfonctionnement sont définis. La spécification de l'observabilité du SFPM permet aussi de déterminer les capteurs à utiliser pour la surveillance.

La conception de la surveillance a pris deux orientations complémentaires :

- La surveillance réactive est locale, de bas niveau [ELK 93]. Elle s'appuie sur une décomposition structuro-fonctionnelle du procédé qui permet une détection et un diagnostic immédiat, grâce à l'utilisation des langages synchrones;
- La surveillance déductive [TOG 92] repose sur une analyse temporelle du procédé pour la détection et sur une décomposition fonctionnelle pour le diagnostic faisant appel à des techniques d'intelligence artificielle.

3.2 La gestion des modes

Au cours ... l'étape de spécification de la gestion des modes, les modes de fonctionnement et de marche du SFPM sont décrits formellement. Cette partie permet aussi de spécifier les contraintes de fonctionnement entre ressources [BOI 91] ou entre fonctionnalité des ressources [KER 96].

L'élaboration du gestionnaire de modes s'appuie un modèle arborescent du SFPM, construit par une analyse ascendante des contraintes spécifiées. Deux approches ont été développées :

- Une approche par le GEMMA, faisant appel à un point de vue plutôt structurel [BOIS 91] permet de gérer la marche et l'arrêt des entités du SFPM;
- L'autre approche [KER 96], plutôt fonctionnelle, repose sur l'utilisation d'un langage synchrone graphique et permet de gérer, d'une façon plus large, les configurations du SFPM.

3.3 La commande prévisionnelle

L'étape d'élaboration d'un ordonnancement prévisionnel permet de déterminer, à partir des gammes opératoires, une commande cyclique déterministe à flux de production maximal. Mais, elle s'avère peu robuste face à des aléas [CAM 97], [KOR 98]. Il y a donc nécessité de superviser le SFPM.

Description d'une opération, d'un noeud

Récapitulatif des caractéristiques associées à une opération de transfert :

```
"Fonction": {transfert<sub>Lieu 1 → Lieu 2</sub>}

"Support de réalisation": {convoyeur n°i}, {robot n°j}, {...}

"Durée opératoire": {temps}

"Critique": {fonctions de transformation}

"Degré de criticité": {nombre} ∈ [0, nombre total de fonctions de transformation délivrées]

"Accessible": {entrée}, {liste de gammes logiques}

"Bloquant": {vrai} ou {faux}

"Etat": {normal} ou {hors-service}

"Statut": {retenue} ou {réservée} ou {possible}

"Pièces sollicitant l'opération": {liste de pièces}

"Pièces transférées": {liste de pièces}
```

Récapitulatif des caractéristiques associées à un noeud :

```
"Noeuds en amont" : {liste de noeuds}

"Noeuds en aval" : {liste de noeuds}

"Opérations potentielles" : {liste d'opérations}

"Opérations possibles" : {liste d'opérations}

"Opérations réservées" : {liste d'opérations}

"Opérations retenues" : {liste d'opérations}

"Etat" : {normal}, {dégradé} ou {hors-service}

"Accessible" : {entrée}, {liste de gammes logiques}

"Bloquant" : {vrai} ou {faux}
```

Ces caractéristiques sont représentées soit par des attributs, soit par des relations, afin d'éviter l'utilisation d'attributs multivalués.

Détermination des entités critiques

Notations relatives aux algorithmes:

Soit $G_{init} = (\Sigma_{Nint}, \Sigma_{Einit})$ le GAO représentant le SFPM. Soit n_{Ginit} le nombre de fonctions de transformation réalisées par le SFPM. Nous notons F_1, \dots, F_{nGinit} les ensembles d'opérations mettant respectivement en oeuvre les fonctions de transformation f_1, \dots, f_{nGinit} . Nop^k représente l'ensemble des opérations composant le noeud_k (Ces opérations sont référencées dans la caractéristique "Opérations potentielles" du noeud_k). Soit F_{Op} l'ensemble des opérations considérées hors-service, R_{Nop} l'ensemble des noeuds à retirer du graphe. NAB(G) correspond à l'ensemble des noeuds non-Acc.E. et/ou Blq.S. relativement au graphe G.

Algorithme de détermination des ressources critiques

```
Boucle 1: Pour chaque ressource R_i faire

F_1, ..., F_{nGinit}, sont les ensembles initiaux;

Lister les opérations Op_{Ri-x} dont la caractéristique "Support de réalisation" contient \{R_i\};

Soit G \setminus Ri = le graphe d'origine G_{init} auquel est retiré l'ensemble \{Op_{Ri-x}\};

(*\Sigma_{NRi} = \Sigma_{Ninit} \setminus \{Op_{Ri-x}\}; \{Op_{Ri-x}\} \text{ sont donc implicitement retirées de } F_1, ..., F_{nGinit}*)

Calculer NAB(G \setminus Ri);

Déterminer, à partir des noeuds de transformation de NAB(G \setminus Ri), l'ensemble NAB_{mOp} des opérations transformation non-Acc. E. ou Blq.E.;

Soit S \cap Ri S \cap R
```

Algorithme de détermination des opérations critiques

```
Boucle 1: Pour chaque opération potentiellement défaillante Op<sub>Ri-fi</sub> faire
           FOp = \emptyset; RNop = \emptyset;
           F_1, \ldots, F_{nGinit} , Nop^1, \ldots, Nop^n sont les ensembles initiaux ;
           Si Op<sub>Ri-fi</sub> n'est pas une opération de transformation alors
                 Case(Op<sub>Ri-fi</sub>) of:
                 Opération de stockage actif appartenant à un noeud de liaison :
                      F<sub>Op</sub> = {opérations des noeuds directement en aval, mais n'appartenant pas au même
                      "support de réalisation" que Op<sub>Ri-fi</sub>};
                 Opération de libre passage :
                      F_{Op} = {opérations des noeuds directement en aval, et appartenant au même "support
                      de réalisation" que Op<sub>Ri-fi</sub>};
                 Opération de transfert :
                      F_{Op} = \{Op_{Ri-fj}\};
                 End Case;
                 Boucle 2: Pour chaque opération Op<sub>Rp-fq</sub> de F<sub>Op</sub> faire
                      Retirer Op<sub>Rp-fq</sub> de Nop<sup>k</sup> contenant cette opération ;
                 Fin Boucle 2;
                 Boucle 3: Pour chaque noeud, faire
                      Si \text{ Nop}^k = \emptyset \text{ alors}
                            noeud_k \in R_{Nop};
                      Fin Si:
                Fin Boucle 3;
                G_{result} = G_{init} \setminus R_{Nop}; (*\Sigma_{Nresult} = \Sigma_{Ninit} \setminus R_{Nop} *)
                Calculer NAB(G_{result});
                Si NAB(G<sub>result</sub>) contient des noeuds de transformation alors (* Op<sub>Ri-fi</sub> est significative *)
                      Déterminer à partir des noeuds de transformation de NAB(Gresult), l'ensemble
                      NAB<sub>mOp</sub> d'opérations de transformation non-Acc.E. ou Blq.S.;
                      Boucle 4 Pour chaque Op<sub>Rt-fs</sub> de NAB<sub>mOp</sub> faire
                           Retirer Op<sub>Rt-fs</sub> de F<sub>s</sub>;
                      Fin Boucle 4;
                      n_{Gres} = nombre d'ensembles parmi F_1, \dots, F_{nGinit}, qui ne sont pas encore non-vides ;
                      d_{Op_{Ri-fi}} = n_{Ginit} - n_{Gres}
                Fin Si;
           Sinon (* Op_{Ri-fi} est une opération de transformation *)
                Retirer Op<sub>Ri-fi</sub> de F<sub>i</sub>;
                Si F_i = \emptyset alors (* Op_{Ri-fi} est critique *)
                      d_{Op_{Ri-fj}} = 1; (* cf. C1. *)
                Fin Si;
           Fin Si;
Fin Boucle 1.
```

<u>Complexité des algorithmes</u>: Posons n_{op} = nombre d'opérations, n = nombre de noeuds, n_a = nombre d'arcs du GAO et n_{res} le nombre de ressources. En considérant que la structure du graphe est implémentée en utilisant une liste des successeurs des noeuds, la complexité du calcul de NAB(G_{result}) est en O($n+n_a$) [AHO 89][GON 95].

Dans le premier algorithme, la boucle 2 est en $O(n_{op})$. Toutes ces instructions sont incluses dans la boucle 1. L'algorithme de détermination des ressources critiques est en $O(n_{res} \times max(n_{op}, n+n_a))$.

Pour le deuxième algorithme, les autres instructions significatives sont les instructions consistant à lister les opérations en $O(n_{op})$. La boucle 2 et la boucle 3 peuvent être négligées, quand n_{op} , n, et n_a croissent. Toutes ces instructions sont incluses dans la boucle 1. L'algorithme de détermination des opérations critiques est en $O(n_{op} \times max(n_{op}, n+n_a))$.

Remarque: Nous rappelons que ces algorithmes sont exécutés hors-ligne.

Détermination de la faisabilité d'une GL

Cette annexe présente une application des algorithmes décrits au chapitre VII. Dans l'état actuel, la maquette logicielle détermine si le graphe peut réaliser une GL et donne un chemin possible.

1. Présentation de la maquette logicielle

La maquette logicielle a été développée en Visual C++. La fenêtre d'application est présentée Figure A-1. Elle est composée de 4 parties :

- Le nom du fichier
- La zone d'information pouvant contenir le graphe, la gamme ou les résultats de la recherche de chemins
- L'ensemble des 6 boutons
- La zone d'entrée directe et de modification

1.1 Saisie du graphe et d'une gamme

Le graphe peut être saisi directement en appuyant sur le bouton "Graphe" de l'encadré "Matrice du graphe" (en haut à droite de la fenêtre). L'utilisateur fournit dans un premier temps le nombre de nœuds de la matrice, puis valide en appuyant sur le bouton correspondant. Il indique ensuite les successeurs de chaque nœud comme le demande le programme, à l'aide des numéros de nœud séparés par un tiret s'il y en a plusieurs (s'il n'y a aucun successeur il suffit de laisser le champ vide). Après chaque nœud l'utilisateur valide la saisie. Une fois tous les successeurs définis il suffit d'accepter et le nouveau graphe apparaît dans la fenêtre de gauche. L'utilisateur a la possibilité d'annuler à tout moment lors de la saisie et l'ancien graphe apparaît alors dans cette même fenêtre.

Une gamme est saisie de la même manière après avoir appuyé sur le bouton "Gamme" de l'encadré "Gamme". L'utilisateur rentre le nombre de fonctions de la gamme, puis les nœuds réalisant chaque fonction (même procédé qu'auparavant, chiffres puis validation). Une fois tous les nœuds définis il suffit d'accepter et la nouvelle gamme apparaît dans la fenêtre de gauche. L'utilisateur a la possibilité d'annuler à tout moment lors de la saisie et l'ancienne gamme apparaît alors dans cette même fenêtre.

Enfin, il est possible de modifier un graphe en cliquant sur le bouton "Modification" de l'encadré "Modification des successeurs d'un nœud" (voir en bas à droite de l'image). L'utilisateur indique le numéro du nœud, valide, indique les nouveaux successeurs et finalement accepte ou annule (même principe que la saisie d'un graphe).

1.2 Affichage des données et calcul d'un chemin

Dans la fenêtre d'information, l'utilisateur peut afficher le graphe avec le bouton "Afficher Graphe" (cf. Figure A-1) et afficher la gamme avec le bouton "Afficher Gamme".

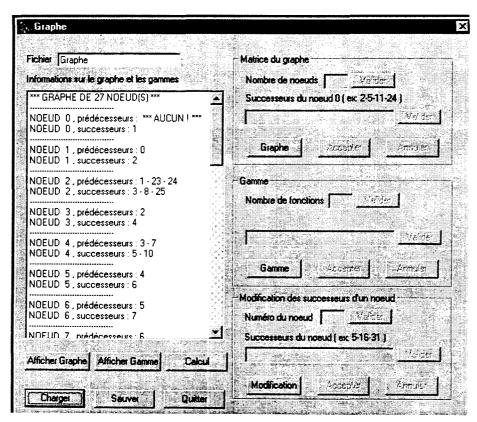


Figure A-1: Affichage du graphe

Si un graphe et une gamme sont définis, l'utilisateur peut lancer le calcul du plus court chemin avec le bouton "Calcul". Le programme récapitule alors la gamme et fournit la succession de nœud formant le chemin trouvé si celui-ci existe. Un séparateur "l" indique un nœud réalisant une fonction. Il renseigne également sur les nœuds qui peuvent être atteint en réalisant la fonction 1 puis ceux réalisant successivement les fonctions 1 et 2, et ainsi de suite jusqu'aux nœuds permettant la dernière fonction. Cela permet de connaître les nœuds susceptibles de participer à la réalisation d'une GL.

Si nous considérons l'exemple Figure A-2, les résultats des calculs sont présentés Figure A-3.

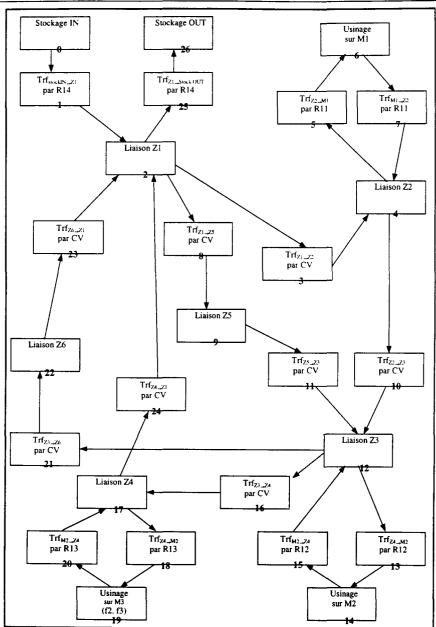


Figure A-2 : Exemple de graphe

Exist

// Dep est le nœud de départ, Arr le nœud d'arrivée. // EnsNouv est l'ensemble de nouveaux reuds atteints à chaque itération.

// EnsSucc est l'ensemble des nœuds successeurs des nœuds de EnsNouv à chaque itération.

// EnsTot est l'ensemble de tous les nœuds parcourus depuis le début de la procédure.

 $EnsNouv = \{ Dep \} ; EnsTot = EnsSucc = \emptyset ;$

// Initialisation

Tant que (EnsNouv $\neq \emptyset$) et que (Arr \notin EnsNouv)

EnsSucc = ensemble des successeurs des nœuds de EnsNouv; // fonction Successeur

EnsNouv = EnsSucc moins les nœuds figurant déjà dans EnsTot; // fonction PriveDe

EnsTot = EnsTot ∪ EnsNouv; // fonction Ajout

// On opère un parcours en largeur, chaque génération contient les successeurs de l'ancienne génération qui n'avaient pas encore été atteints. Au bout d'un moment, soit on ne trouve plus de nouveau nœud, et dans ce cas il n'existe pas de chemin, soit on atteint Arr, et dans ce cas le chemin existe.

Fin Tant que

Si EnsNouv est vide on retourne FALSE

Sinon on retourne TRUE.

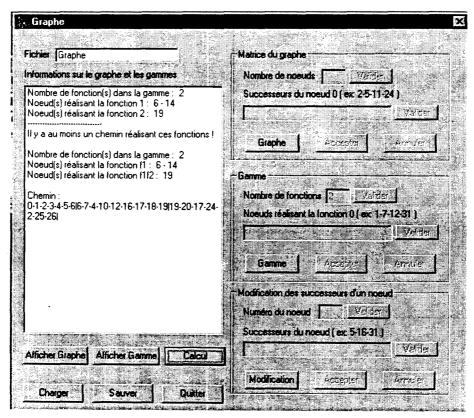


Figure A-3: Résultat du calcul (GL réalisable et proposition d'un chemin)

La fonction ExistEns (int * Ens, int n), qui détermine s'il existe un chemin entre un des nœuds de Ens et n, ne fait que lancer la fonction Exist en prenant comme nœud de départ tous les nœuds de Ens jusqu'à en trouver un qui atteigne le nœud n.

La recherche d'existence d'un chemin est effectuée dans la procédure Gamme (int * Fonctions), dont l'algorithme est détaillé page suivante.

Gamme

// Fct est l'ensemble des nœuds réalisant la fonction i.

// ANBfi est l'ensemble des nœuds Accessibles et Non-Bloquants réalisant la fonction i

// ANBg[i] est l'ensemble des nœuds Accessibles et Non-Bloquants mettant en oeuvre les fonctions 1 à i,

(c'est à dire les nœuds ANB terminant un chemin qui mettent en oeuvre les fonctions 1 à i).

// Temp est un ensemble temporaire afin de faciliter les modifications des autres ensembles.

Fct = ANBfi = temp = \emptyset ; ANBg[1] = ensemble des nœuds Accessibles et Non-Bloquants mettant en oeuvre la fonction 1

// Initialisation

Pour i = 2 à n // n étant ici le nombre de fonctions dans la gamme, n = Fonction[0]

Fct = ensemble des nœuds réalisant fi ; // Pris dans l'ensemble Fonctions

ANBfi = ensemble des nœuds Accessibles et Non-Bloquants mettant en oeuvre la fonction i ;

// Accessible signifie qu'il existe un chemin du nœud de départ jusqu'au nœud considéré, Non-Bloquant signifie qu'il existe un chemin du nœud considéré jusqu'au nœud d'arrivée. Ces deux tests utilisent la fonction **Exist**.

ANBg[i] = ensemble des nœuds Accessibles et Non-Bloquants mettant en oeuvre les fonctions 1 à i; // Pour trouver ces nœuds, il suffit de chercher les nœuds de ANBg[i] qui sont accessibles depuis les nœuds de l'ancienne génération de ANBg[i-1] (qui mettent en oeuvre les fonctions 1 à i-1). On utilise pour cela ExistEns.

Fin Pour

Si ANBg[n] est vide on retourne FALSE

Sinon on retourne TRUE.

// En effet, à la fin de la boucle, ANBg[n] contient les nœuds réalisant les fonctions 1 à n. Si de tels nœuds existent, la gamme est réalisable. Cette fonction remplit la variable Gam.

Les ensembles ANBg[i] contiennent ainsi les nœuds Accessibles et Non-Bloquants mettant en oeuvre les fonctions 1 à i. Ils sont utilisés par la suite.

1.3 Détermination d'un chemin réalisant la gamme

La détermination d'un chemin passe par l'utilisation d'une pseudo matrice d'accessibilité où sont mentionnés non seulement les accessibilités mais aussi le nombre minimal d'arcs à emprunter pour aller d'un nœud i à un nœud j.

L'algorithme de la procédure *Accessibilite* est similaire à celui de la procédure **Exist**, mais exécuté pour chaque nœud.

// Pour chaque noeud, on opère un parcours en largeur. Chaque génération contient les successeurs de l'ancienne génération qui n'avaient pas encore été atteints. Le parcours continue jusqu'à ce qu'on ne trouve plus aucun nouveau successeur.

Une fois que l'on a montré l'existence d'un chemin réalisant la gamme avec l'aide de la procédure *Gamme*, on remplit la matrice d'accessibilité par la procédure *Accessibilite*, puis on lance la procédure *Chemin*.

L'algorithme a été codé de façon non récursive, de façon à exiger moins de place mémoire lors de son utilisation.

CHEMIN

Il la fonction chemin effectue un parcours arrière du graphe pour trouver la succession des nœuds de transformation et effectue une recherche en profondeur afin de trouver les nœuds intermédiaires entre deux nœuds mettant en oeuvre des fonctions consécutives de la GL.

j = n // nombre de fonctions à réaliser.

Dep; Arr = nœud d'arrivée; // numéros respectifs des nœuds de départ (première fonction) et d'arrivée (fonction suivantes).

Dist // distance (en nombre de nœuds) entre Dep et Arr.

Tant que (i > 0) faire

Dep = premier nœud de ANBg[j] connecté à Arr // matrice d'accessibilité

Dist = distance entre Dep et Arr

 $s = \emptyset$;// chemin entre deux nœuds de fonction.

Tant que (dist != 1) faire

Dist décrémentée de 1

Pour i de 0 à Nb_nœuds // recherche du premier successeur de Dep qui permette d'aller jusqu'à Arr Si distance de i à Arr = dist alors Dep = i // matrice d'accessibilité

Fin pour

s = s + Dep

Fin tant que

Route = Route + s + Arr + "|"

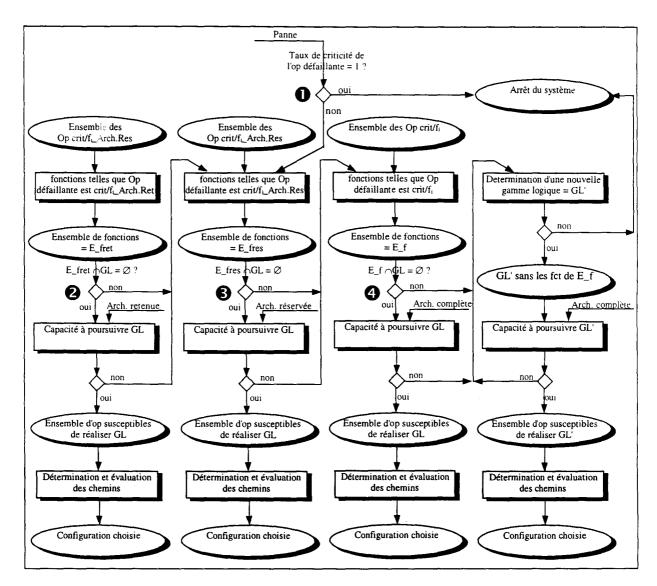
Arr = ancien Dep // les nœuds Arr et Dep remontent le graphe

j décrémenté de 1

Fin tant que

// le chemin peut alors être affiché avec la fonction AfficheChemin.

Procédure de reconfiguration



- Si l'opération en panne a un taux de criticité maximal, aucune des fonctions délivrées par le SFPM n'est disponible. L'élément doit être réparé avant d'envisager une quelconque production.
- ② Si l'opération est crit/f_{i_}Arch.ret., avec f_i faisant partie d'une GL actuellement produite, le recouvrement passe directement à l'évaluation de l'architecture réservée.
- Si l'opération est crit/f_{i_}Arch.res., avec f_i faisant partie d'une GL actuellement produite, le recouvrement passe directement à l'évaluation de l'architecture totale.
- 3 Si l'opération est crit/f_i le recouvrement passe directement à la phase de détermination d'une autre production sans évaluer la capacité à poursuivre la production de l'architecture.

LISTE

DES

FIGURES

FIGURE I-1: EXEMPLE DE REPRÉSENTATION D'UN PROCESSUS DISCRET	11
FIGURE I-2 : TYPES DE FLEXIBILITÉS CONSIDÉRÉS ET IMPLICATIONS	12
FIGURE I-3: SCHÉMA DE PRINCIPE D'UN SYSTÈME AUTOMATISÉ DE PRODUCTION	14
FIGURE I-4 : FLEXIBILITÉ ET PRODUCTIVITÉ [BAR 92]	15
FIGURE I-5 : DIAGRAMME EN ROUE CIM	18
FIGURE I-6 : PYRAMIDE CIM	21
Figure I-7: Architecture de contrôle d'un SFPM selon CASPAIM [CRA 94]	22
FIGURE I-8 : DÉMARCHE DE CONCEPTION DE CASPAIM	23
FIGURE I-9 : INTÉGRATION PRINCIPALEMENT CENTRÉE SUR LA COMMANDE	
FIGURE I-10 : INTÉGRATION D'UN CONTRÔLE TACTIQUE	26
Figure I-11: Modèle de base de la supervision au sens RW	30
Figure I-12 : Restriction des états accessibles par le système en boucle fermée	30
FIGURE I-13 : SCHÉMA DE COMMANDE SUPERVISÉE	32
FIGURE I-14: TRAJECTOIRES ADMISES EN COMPENSATION	
FIGURE I-15: UTILISATION DU COMPENSATEUR	34
FIGURE I-16 : PRINCIPE DE COMPENSATION	35
FIGURE I-17 : MODÈLE EPO D'UN VÉRIN HYDRAULIQUE	36
FIGURE I-18 : EXEMPLE DE MODÉLISATION BASÉ SUR LE MESAP	37
Figure I-19 : Processus d'élaboration de la reconfiguration	38
FIGURE I-20 : CONCEPT DE RECONFIGURATION	39
Figure I-21: Module de commande / surveillance	41
FIGURE I-22 : MODÉLISATION D'UNE ACTIVITÉ À L'AIDE DU FORMALISME RDP OBJET	42
FIGURE I-23 : SCHÉMA CONCEPTUEL DE LA SUPERVISION	43
FIGURE I-24 : AUTOMATE DES MODES D'EXPLOITATION	43
Figure I-25 : Surveillance directe	
FIGURE I-26 : INTERVALLE DE VALIDATION DE COMPTE-RENDU	46
Figure I-27 : GF du centre d'usinage	46
Figure I-28 : Familles de modes	
FIGURE II-1 : SCHÉMA FONCTIONNEL DE LA SUPERVISION [BER 96]	53
FIGURE 1I-3 : INTÉRÊT DE LA CLASSIFICATION (CAS D'UNE DÉFAILLANCE CRITIQUE)	
FIGURE II-4 : DÉMARCHE CASPAIM MODIFIÉE INTÉGRANT LA SUPERVISION	
FIGURE II-5: RÔLE DU RECOUVREMENT	
Figure II-6 : Processus de défaillance	
FIGURE II-7: Principe de l'arrêt / réparation	
FIGURE II-8: INTÉRÊT DE LA RECONFIGURATION SUR LA DISPONIBILITÉ D'UN SFPM	
FIGURE II-9 : LES MODÈLES POUR LA SUPERVISION	73
Figure II-10 : Modèle canonique d'après Le Moigne	•••••
FIGURE II-11 : DÉMARCHE D'ÉLABORATION DU MODÈLE	78
FIGURE II-12 : Exemple de cellule flexible	
Figure II-13 : Spécialisation des fonctions	
Figure II-14 : Correspondance entre fonctions et opérations	
FIGURE II-15: REPRÉSENTATION DE LA RELATION OPÉRATION	
Figure II-16 : Opérations et fonctions de classification associées	
FIGURE II-17: TAXONOMIE DES OPÉRATIONS	83
FIGURE III-1: ARCHITECTURE FLEXIBLE	
FIGURE III-2: EXEMPLE D'ARBRE DE DÉFAILLANCE	
FIGURE III-3: DÉCOMPOSITION DE SHANNON DE LA FONCTION F	
FIGURE III-4 : DIAGRAMME DE DÉCISION BINAIRE ASSOCIÉ À L'ARBRE DE DÉFAILLANCE FIGURE III-2	
FIGURE B-5: DIAGRAMME DE FIABILITÉ ÉQUIVALENT À L'ARBRE DE DÉFAILLANCE FIGURE III-2	
FIGURE III-6: EXEMPLE DE GRAPHE DE MARKOV	
FIGURE III-7: EXEMPLE DE FACTEURS D'IMPORTANCE	
FIGURE III-8: VISION SYSTÈME DE LA DISPONIBILITÉ D'UNE FONCTION DU SFPM	
FIGURE III-9 : EXEMPLE DE SEPM TOLÉRANT	103

Liste des figures	
FIGURE IV-1: REPRÉSENTATION DE PLUSIEURS RELATIONS UTILISANT PLUSIEURS SCHÉMAS	
FIGURE IV-2: TRANSCRIPTION D'UNE PROPRIÉTÉ PAR UNE RELATION (EN LANGAGE UML)	110
Figure IV-3 : La relation d'accessibilité	111
FIGURE IV-4 : INDISPONIBILITÉ D'UNE OPÉRATION DU SFPM	112
FIGURE IV-5 : EXEMPLE DE GAO CORRESPONDANT AU SFPM REPRÉSENTÉ FIGURE III-9	113
FIGURE IV-6 : PASSAGE DU GAO AU RDP - ANALOGIE ENTRE ACCESSIBILITÉ ET VIVACITÉ	
FIGURE IV-7 : INTÉRÊT DU GAO POUR LA REPRÉSENTATION DES ACCESSIBILITÉS	
FIGURE IV-8 : DÉMARCHE D'OBTENTION DU GAO	118
Figure IV-9 : Opération d'usinage agrégée	120
Figure IV-10 : Opération de liaison	121
FIGURE IV-11 : OPÉRATION DE TRANSFERT AGRÉGÉE	121
FIGURE IV-12: ASSOCIATION DES OPÉRATIONS AUX NOEUDS	
FIGURE IV-13: PASSAGE DES OPÉRATIONS AUX NOEUDS	
FIGURE IV-14: EXEMPLE DE CELLULE	
FIGURE IV-15: CORRESPONDANCE ENTRE NOEUDS ET OPÉRATIONS	125
Figure IV-16 : GAO correspondant à l'exemple Figure IV-14	
FIGURE V-1 :DÉMARCHE GÉNÉRALE D'ÉVALUATION DE LA TOLÉRANCE D'UNE ARCHITECTURE	
FIGURE V-2: INTÉGRATION DE L'ÉVALUATION DE LA TOLÉRANCE DANS UNE DÉMARCHE DE CONCEPTION	
FIGURE V-3: EVALUATION RÉCURSIVE DE LA TOLÉRANCE D'UNE ARCHITECTURE	
FIGURE V-4 : DÉMARCHE D'OBTENTION DES ENTITÉS CRITIQUES	
FIGURE V-5 : TAUX DE PANNE RELATIFS À L'EXEMPLE FIGURE IV-14	
Figure V-6 : Démarche expérimentale	
FIGURE V-7 : EVALUATION DE LA TOLÉRANCE D'ARCHITECTURES TYPES [BER 98/D]	148
Figure V-8 : Tableau de classement des architectures	150
FIGURE V-9 : INTÉRÊT D'UN SYSTÈME TOLÉRANT DU POINT DE VUE PRODUCTION	151
Figure VI-1 : Interactions des modules décisionnels et opérationnels pour l'élaboration d'une	
RECONFIGURATION	
FIGURE VI-2 : PROCESSUS DE RESTRICTION DE LA PRISE EN COMPTE DES FLEXIBILITÉS	
FIGURE VI-3: CAS D'UN CHANGEMENT DE COMMANDE LOCALE	
FIGURE VI-4: RECONFIGURATION PAR MODIFICATION DES DOMAINES DE COULEUR	
Figure VI-5 : Modes considérés	
Figure VI-6 : Décisions à prendre pour un produit susceptible d'être affecté par une défaillanc	CE.170
Figure VI-7 : Prise en compte progressive des potentialités de l'architecture	172
Figure VI-8: Choix d'une nouvelle production avec réordonnancement $(T_{ordo} \ll T_{réparation})$	
FIGURE VI-9 : STRATÉGIES DE RECOUVREMENT	174
Figure VI-10 : Procédure de recherche de configuration	176
Figure VI-11: Exemple d'architecture	
Figure VII-1 : Recherche progressive de potentialités	186
COMPLÈTE	188
FIGURE VII-3 : APPARITION DU COMPTE RENDU ATTENDU DANS LA FENÊTRE ICRI	
FIGURE VII-4: PAS DE COMPTE RENDU APRÈS ΔTM	
FIGURE VII- 5 : GAO PARTIEL RELATIF À L'ARCHITECTURE FIGURE IV-14	
FIGURE VII-6: LIEN ENTRE LA COMMANDE ET LE GAO (OPÉRATIONS SOLLICITÉES)	
FIGURE VII-7 : CHANGEMENT D'ÉTAT D'UNE RESSOURCE EN CAS DE DÉFAILLANCE COMPLÈTE	
FIGURE VII-8: CAS CONSIDÉRÉS POUR UNE OPÉRATION [BER 98/B]	
FIGURE VII-9 : EXEMPLE DE CARACTÉRISTIQUES D'UN NOEUD D'USINAGE	
FIGURE VII-10: EXEMPLE DE GAO	
Figure VII-11: Algorithme de détermination des noeuds Acc. / GL	
FIGURE VII-12: PRINCIPE DE LA DÉTERMINATION EXPLICITE DES CHEMINS	201
FIGURE VII-13: ALGORITHME DE DÉTERMINATION DES CHEMINS	
FIGURE VII-14 : RÉSULTAT DES ALGORTIHMES APPLIQUÉS AU GAO FIGURE IV-14	202
FIGURE VII-15: CALCUL DES 3 ENSEMBLES D'OPÉRATIONS CRITIQUES	205
FIGURE VII-16: NOUVELLE FONCTION D'ÉVALUATION DU SYSTÈME	E 0506
FIGURE VII-15: CALCUL DES 3 ENSEMBLES D'OPÉRATIONS CRITIQUES	KARE UN
/ <u>\\\\\\\\\\\\\\\\\\\\\\\\\\\\\\\\\\\\</u>	Ty.
[2]	. د
[3]	40
\ <u>``</u>	\

1505 1E03