7 facettes du GRAFCET

Approches pratiques de la conception à l'exploitation

ouvrage coordonné par
Dominique GENDREAU

CÉPADUÈS-ÉDITIONS

CHEZ LE MEME EDITEUR

Le GRAFCET ..... *ADEPA/AFCET*
Comprendre, maîtriser et appliquer le GRAFCET ..... *M. Blanchard*
Le grafcet : les nouveaux concepts ..... *GREPA (ADEPA)*

© CEPAD 2000

ISBN : 2.85428.461.5

Le code de la propriété intellectuelle du 1er juillet 1992 interdit expressément la photocopie à usage collectif sans autorisation des ayants droit. Or, cette pratique en se généralisant provoquerait une baisse brutale des achats de livres, au point que la possibilité même pour les auteurs de créer des œuvres nouvelles et de les faire éditer correctement serait alors menacée.
Nous rappelons donc que toute reproduction, partielle ou totale, du présent ouvrage est interdite sans autorisation de l'éditeur ou du Centre français d'exploitation du droit de copie (CFC – 3, rue d'Hautefeuille – 75006 Paris).

Dépôt légal : mai 2000

N° éditeur : 461

COLLECTION AUTOMATISATION ET PRODUCTION

7 facettes du GRAFCET

Approches pratiques de la conception à l'exploitation

Alain BODART
Véronique CARRE-MENETRIER
Pierre DE LOOR
Jean-Bernard DELUCHE
Jacques DUPONT
Dominique GENDREAU
Joël HANCQ
Alain KRIL
Jean NIDO

CÉPADUÈS-ÉDITIONS
111, rue Nicolas-Vauquelin
31100 TOULOUSE
Tél. : 05 61 40 57 36 – Fax : 05 61 41 79 89
(de l'étranger) + 33 5 61 40 57 36 – Fax : + 33 5 61 41 79 89
http ://www.editions-cepadues.fr
e.mail : cepadues@editions-cepadues.fr

AVERTISSEMENT

Au titre de cet ouvrage « 7 facettes du Grafcet » est assorti le sous-titre suivant : « Approches pratiques de la conception à l'exploitation ». Le lecteur comprendra ainsi que l'ouvrage ne présente pas plusieurs aspects du modèle Grafcet proprement dit, mais traite de différentes facettes de son utilisation. Il est le fruit de l'expérience et de la pratique de spécialistes du Grafcet.

L'aspect pratique abordé dans cet ouvrage permettra au lecteur de mieux utiliser le Grafcet et de mieux appréhender les notions qui y sont rattachées, telles que modèle, frontière de description, point de vue, dans les phases de conception, validation et implantation.

Les auteurs ont mené pendant plusieurs années une réflexion commune, guidés essentiellement par un souci pédagogique. Chaque chapitre ayant été rédigé par un ou deux d'entre eux, le lecteur pourra remarquer quelques différences de style ; toutefois les auteurs faisant partie d'une même communauté d'automaticiens, ils ont utilisé un vocabulaire commun tout au long de l'ouvrage. Le lecteur, étant lui même initié à ce langage particulier, appréciera la rigueur des termes employés.

TABLE DES MATIERES

Introduction **11**

Chapitre 1 : Le Grafcet, un outil parmi d'autres (partie rédigée par A. BODART et P. DE LOOR) **13**

1.1. Caractéristiques d'un modèle de commande d'un système automatisé 15
1.1.1. Qu'est-ce qu'un système ? 15
1.1.2. Qu'appelle-t-on un système automatisé ? 17
1.1.2.1. Composition d'un système automatisé 17
1.1.2.2. Rôle d'un opérateur 18
1.1.3. Grandeurs et prise en compte du temps 18
1.1.4. Qu'appelle-t-on commande d'un système automatisé ? 20
1.1.5. Qu'est-ce qu'un Modèle ? 20
1.1.6. Notion de modèle de commande de système automatisé 21
1.1.7. Le Grafcet est-il un bon modèle de commande des S.A.P.? 21
1.1.8. Les étapes de la modélisation 23
1.2. Le Grafcet face à d'autres modèles des S.A.P. 24
1.2.1. Pourquoi existe-t'il différents modèles de commande et de spécification ? 24
1.2.2. Proposition d'une classification 24
1.3. Le Grafcet et les autres outils de modélisation 26
1.3.1. Le Grafcet 26
1.3.2. Caractéristiques des autres outils de spécification proches du Grafcet 26
1.3.2.1. Le GEMMA 26
1.3.2.2. Statechart 26
1.3.2.3. Le réseau de Petri 27
1.3.2.4. Le graphe d'état 27
1.3.3. Position des autres outils de spécification par rapport au Grafcet 27
1.3.3.1. SADT (actigramme) 27
1.3.3.2. Le diagramme SA-RT 28
1.3.3.3. L'expression textuelle 28
1.3.4. Caractéristiques des autres outils de conception / simulation proches du Grafcet 28
1.3.4.1. L'organigramme 28
1.3.4.2. La table états-événements 29
1.3.5. Position des autres outils de conception / simulation par rapport au Grafcet 29
1.3.5.1. L'expression logique 29
1.3.5.2. Le chronogramme 29
1.3.5.3. Le diagramme de Gantt 30
1.3.5.4. Le diagramme automatologique 30
1.3.5.5. Process Charts 30
1.3.6. Les outils d'implantation d'une partie commande programmée 31
1.3.6.1. Le diagramme fonctionnel en séquence (SFC : Sequential Function Chart) 31
1.3.6.2. Le langage liste d'instructions (IL : Instruction List) 31
1.3.6.3. Le langage littéral structuré (ST : Structured Text) 31
1.3.6.4. Le langage à contact (LD : Ladder Diagram) 32
1.3.6.5. Le langage blocs fonctionnels (FBD : Function Block Diagram) 32
1.3.7. Les outils d'implantation d'une partie commande câblée 32
1.3.7.1. Le logigramme 32
1.3.7.2. La schématique électrique 33
1.4. Critères de choix d'un modèle 33
1.5. Conclusion 33
1.6. Pour en savoir plus 34
1.6.1. Références bibliographiques 34
1.6.2. Références bibliographiques sur l'historique de l'automatique 35
1.6.3. Quelques sites à visiter sur Internet 35
1.6.4. Les logiciels 35

Chapitre 2 : Grafcet et normalisation (partie rédigée par J.-B. DELUCHE) **37**

2.1. Les étapes de la normalisation du Grafcet 39

2.1.1. Les organismes de normalisation ... 39
2.1.2. La chronologie ... 39
2.1.3. La norme NF C03-190 ... 40
2.1.3.1. Domaine d'application ... 40
2.1.3.2. Structure d'un système automatisé ... 40
2.1.4. La norme CEI 60848 ... 41
2.1.5. La norme CEI 1131-3 ... 42
2.2. Les éléments normalisés (CEI/IEC 848) ... 43
2.2.1. Les éléments graphiques ... 43
2.2.1.1. Les étapes ... 43
2.2.1.2. Les transitions ... 44
2.2.1.3. Sélection de séquence ... 45
2.2.1.4. Séquences simultanées ... 45
2.2.1.5. Les liaisons orientées ... 46
2.2.2. Le comportement dynamique ... 47
2.2.3. Les éléments de simplification graphique ... 48
2.2.3.1. Réutilisation de la même séquence ... 49
2.2.3.2. Représentation détaillée d'une étape ... 49
2.3. Autres concepts non normalisés ... 50
2.3.1. Notions graphiques ... 50
2.3.1.1. Extension du concept général d'étape ... 50
2.3.1.2. Extension du concept général de transition ... 50
2.3.1.3. Définition de la macro-étape ... 51
2.3.2. Notions hiérarchiques ... 51
2.3.2.1. Structure d'un grafcet global ... 51
2.3.2.2. Ordres de forçage ... 52
2.3.3. Notions temporelles ... 52
2.3.4. Notions de stabilité ... 53
2.4. Quelles normes utiliser ? ... 54
2.5. Références bibliographiques ... 54

Chapitre 3 : Les frontières de description (partie rédigée par J. DUPONT et J. HANCQ) ... **55**
3.1. Frontières de description et modèle Grafcet ... 57
3.1.1. Perception des « Frontières de description » dans le modèle Grafcet ... 57
3.1.2. Perception des « Frontières de description » au travers des normes relatives au Grafcet ... 58
3.1.3. Influence des postulats temporels ... 59
3.1.4. Extension du Grafcet et frontières de description ... 59
3.2. Frontières de description dans le concept de modélisation par Grafcet ... 59
3.2.1. Position du problème ... 59
3.2.2. Modélisation et frontières de description ... 61
3.2.2.1. Le point de vue ... 61
3.2.2.2. Le niveau de spécification ... 63
3.2.2.3. Le degré de finesse ... 63
3.3. Exemple relatif à l'application n° 1 – Machine à assembler ... 64
3.3.1. Elément décrit ... 64
3.3.2. Points de vue et frontières de description ... 64
3.3.3. Choix d'un capteur et frontières de description ... 67
3.4. Exemple relatif à l'application n° 2 – Réchauffeur ... 68
3.4.1. Elément décrit ... 68
3.4.2. Points de vue et frontières de description ... 68
3.5. Comment se situer lors d'une description par Grafcet ? ... 72
3.6. Références bibliographiques ... 72

Chapitre 4 : Eléments de construction d'un grafcet (partie rédigée par J. NIDO et D. GENDREAU) ... **73**
4.1. Problématique de la conception ... 75
4.2. Elaboration de structures Grafcet ... 76
4.2.1. Eléments de base de construction d'un grafcet ... 76
4.2.1.1. Symbole général d'une étape et d'une transition ... 76
4.2.1.2. Liaisons orientées ... 77
4.2.2. Structures de base déduites ... 78
4.2.2.1. Structure de séquence linéaire ... 78
4.2.2.2. Structure de sélection de séquences ... 78

4.2.2.3. Structure de séquences simultanées 80
4.2.3. Comment détecter des erreurs de syntaxe dans la construction d'une structure ? 80
4.2.4. Structures génériques décrivant une fonction 82
4.2.4.1. Spécification d'une fonction mémoire 82
4.2.4.2. Spécification d'une fonction de comptage 83
4.2.4.3. Spécification d'une fonction de pile 84
4.2.4.4. Spécification d'une fonction de file d'attente 84
4.2.4.5. Spécification d'un couplage de séquences 85
4.2.4.6. Spécification du partage d'une ressource 85
4.3. Différentes approches pour la construction de grafcets 86
4.3.1. Construction d'un grafcet par intégration de structures 86
4.3.1.1. Première description : structure linéaire monolithique 86
4.3.1.2. Seconde description : utilisation de la notion de séquence réutilisable 87
4.3.1.3. Troisième description : utilisation de la structure de pile 88
4.3.1.4. Quatrième description : utilisation de la structure de file d'attente 88
4.3.1.5. Cinquième description : utilisation d'un compteur décrit en Grafcet 89
4.3.1.6. Sixième description : utilisation d'un compteur externe à la description Grafcet 89
4.3.2. Construction d'un grafcet à partir d'une analyse de flux de produits 90
4.3.3. Construction de grafcet de synchronisation des tâches 91
4.3.3.1. Partition des tâches fonctionnelles 91
4.3.3.2. Définition des entrées/sorties du sous-système à synchroniser 91
4.3.3.3. Recherche des antériorités et des postériorités 92
4.3.3.4. Elaboration d'éléments de graphe associés à chaque tâche fonctionnelle 92
4.3.3.5. Elaboration du grafcet de coordination des tâches 93
4.3.4. Construction d'un grafcet de modes de marche et d'arrêt 94
4.4. Quelle approche utiliser ? 97
4.5. Références bibliographiques 97

Chapitre 5 : Grafcet et graphe d'état (partie rédigée par V. CARRE MENETRIER et P. DE LOOR) **99**
5.1. Graphe d'états : spécification et validation 101
5.1.1. Spécification du comportement de la partie opérative 102
5.1.2. Spécification de la commande 102
5.1.3. Principe de la validation 103
5.2. Grafcet et graphe d'états : la problématique de la validation 104
5.2.1. Graphe d'états d'un grafcet 104
5.2.2. Les difficultés 104
5.2.2.1. L'explosion combinatoire 104
5.2.2.2. Le comportement temporel du Grafcet 105
5.2.2.3. Les difficultés d'interprétation du Grafcet 105
5.3. Identification de l'évolution d'un grafcet 106
5.3.1. Prise en compte de la structure 106
5.3.2. Prise en compte des équations logiques des réceptivités 108
5.3.3. Prise en compte des postulats temporels 108
5.3.3.1. Graphe d'évolution à l'échelle des temps externes 109
5.3.3.2. Explosion combinatoire du nombre des évolutions possibles 109
5.3.4. Prise en compte de la partie opérative 110
5.4. Validation en phase de conception d'un grafcet 111
5.4.1. Première approche de modélisation : description intuitive 111
5.4.2. Deuxième approche de modélisation : optimisation du fonctionnement 112
5.4.3. Phase de validation de la conception 112
5.4.4. Vers l'obtention d'un grafcet sécurisé 113
5.5. Quel graphe pour quoi faire ? 114
5.6. Références bibliographiques 115

Chapitre 6 : Distance entre modèle Grafcet et son implantation (partie rédigée par A. KRIL) **117**
6.1. Modélisation du fonctionnement des systèmes automatisés 119
6.1.1. Le modèle Grafcet 119
6.1.2. Les deux approches 120
6.1.3. Les distances 120
6.2. La programmation d'une spécification Grafcet sur des automates programmables industriels 121
6.2.1. Les causes liées au couple Grafcet – Logique programmée 121
6.2.2. Les causes liées aux techniques de traitement des A.P.I. 121

6.2.3. Le langage de programmation 121
6.2.4. Les causes liées à la recherche de rapidité de traitement 122
6.3. Sources de distances entre le réel, la spécification Grafcet et sa réalisation programmée 122
6.3.1. Par rapport aux événements externes et internes 122
6.3.1.1. Exemple de simultanéité d'événements externes non corrélés 122
6.3.1.2. Exemple de simultanéité d'événements internes 124
6.3.1.3. Exemple de durée de maintien d'une entrée de la P.C. 125
6.3.1.4. Conclusion 125
6.3.2. Par rapport au retard de causalité 126
6.3.3. Par rapport aux méthodes de programmation orientées Grafcet 127
6.3.3.1. Les méthodes orientées « activation d'étape » 127
6.3.3.2. Les méthodes orientées « franchissement de transition » 129
6.3.4. Par rapport à la recherche ou la non recherche de stabilité 129
6.3.4.1. Analyse du comportement théorique d'un grafcet 129
6.3.4.2. Analyse du comportement réel d'une machine 130
6.3.5. Par rapport à la répartition du traitement sur plusieurs unités de commande 132
6.3.5.1. Spécification sans prise en compte de l'architecture de la partie commande 132
6.3.5.2. Prise en compte de l'architecture de la partie commande 132
6.3.5.3. Comportement attendu dans le cas d'une partie commande répartie 133
6.3.5.4. Exemple lié à l'application n° 1 134
6.4. Mise en garde concernant l'implantation 135
6.5. Références bibliographiques 136

Chapitre 7 – Applications (partie rédigée par D. GENDREAU et J. HANCQ) **137**
7.1. Application n° 1 : machine à assembler les masses 139
7.1.1. Composition générale de la machine 139
7.1.2. Description fonctionnelle 140
7.1.2.1. Analyse fonctionnelle S.A.D.T. de la machine à assembler les masses 141
7.1.2.2. Sous-ensemble d'assemblage 143
7.1.2.3. Sous-ensemble de conditionnement 145
7.1.3. Fonctionnement du poste 1 145
7.1.4. Fonctionnement des postes 2 et 3 146
7.1.5. Fonctionnement du poste 4 147
7.1.6. Fonctionnement du poste 5 149
7.1.7. Approvisionnement en palettes par le descenseur 149
7.1.8. Evacuation et stockage des palettes pleines 150
7.1.9. Synchronisation des postes et conduite du système 151
7.2. Application n° 2 : réchauffeur d'huile 154
7.2.1. Introduction au réchauffeur d'huile : cadre d'application 154
7.2.2. Une transcription pédagogique 154
7.2.3. Description de l'installation 154
7.2.4. Conduite de l'installation 157
7.2.4.1. Etats fondamentaux 157
7.2.4.2. Mise à l'arrêt 157
7.2.4.3. Démarrage 158
7.2.5. Une description Grafcet basée sur les modes de marche et d'arrêt 159
7.2.6. Description du fonctionnement global 164

Bibliographie **167**

INTRODUCTION

Besoin exprimé

En s'appuyant sur les résultats d'une enquête[1] sur l'enseignement du Grafcet réalisée auprès d'enseignants de l'Éducation Nationale française, belge francophone et québécoise et sur les préoccupations exprimées par les participants à l'Université d'Eté[2] sur les techniques d'élaboration et d'évaluation d'un grafcet, un groupe d'auteurs a décidé d'élaborer un ouvrage présentant certains aspects du Grafcet et ses applications.

Plusieurs écrits portant sur le Grafcet sont parus au cours des dernières années, certains sont plus axés sur le modèle Grafcet proprement dit ou sur ses applications, d'autres sont rédigés selon un programme d'enseignement. L'ouvrage que nous présentons ici vient en complément, et apporte au lecteur des éléments de réflexion qui lui permettront de prendre du recul, par rapport aux situations qu'il rencontre lors de sa pratique du Grafcet.

Lecteurs potentiels

L'ouvrage s'adresse en priorité aux enseignants du secondaire (en lycée technique et professionnel), et du supérieur (facultés, IUT et écoles d'ingénieurs).

Il trouve également une place intéressante dans tous les cycles de formations initiales ou continues, des organismes publics et privés.

Il servira également aux futurs enseignants en formation dans les IUFM et dans les ENS ainsi qu'à ceux des centres de préparation aux CAPET et aux concours d'Agrégation des filières de Génie Mécanique, Génie Électrique, Génie Chimique et Génie Thermique.

Enfin, cet ouvrage s'adresse à toute personne désireuse de mieux cerner l'intérêt du Grafcet et de juger de sa pertinence, grâce à deux exemples développés permettant une approche plus appliquée des concepts.

Son appréhension nécessite la connaissance des éléments de base, des règles de syntaxe et des règles d'évolution. De plus, il demande une certaine pratique du Grafcet (lecture et écriture des structures de base). Ces prérequis étant connus, cet ouvrage permet alors de mieux comprendre comment utiliser tous les concepts.

Les problèmes posés

L'ouvrage se décompose en 7 chapitres qui présentent chacun une facette du Grafcet.

Avant d'aborder toute modélisation, il est important de choisir l'outil le mieux adapté à la description souhaitée. Le premier chapitre, dans une présentation comparative de différents outils de modélisation, permet de mieux cerner le champ d'application de chacun.

Le deuxième chapitre se focalise sur le Grafcet et ses aspects normatifs. Les normes sont le fruit, au travers d'un comité de normalisation, d'un consensus entre individus de sensibilités professionnelles différentes et sont garantes d'un certain nombre de principes établis. Cependant, une norme se doit d'être suffisamment stricte pour trouver son intérêt mais suffisamment souple pour ne pas brider son utilisation. Ce paradoxe mène à des documents parfois un peu flous ou imprécis et rend leur utilisation délicate.

Le troisième chapitre de l'ouvrage est consacré à l'environnement du Grafcet dans la partie commande. Une confusion est souvent faite au niveau des entrées-sorties par manque de maîtrise des frontières de la modélisation. La notion de point de vue abordée ici est essentielle lorsque l'on veut créer, comprendre ou utiliser un grafcet. Elle permet de mieux définir le cadre de conception.

La conception d'un grafcet est une activité créatrice qui prend appui sur des règles de syntaxe mais qui n'est dictée par aucune méthodologie précise. Les éléments de construction présentés dans le chapitre 4 permettent au concepteur une approche plus rationnelle, sans pour autant

1. Réalisée en 1990 par le groupe « GRAFCET et Enseignement » dont les résultats ont été publiés au congrès GRAFCET'92 (voir bibliographie).
2. Organisée en 1993 à l'ENS de CACHAN, par le groupe « GRAFCET et Enseignement » (voir bibliographie).

lui dicter une manière de faire qui annihilerait son esprit créatif.

Le cinquième chapitre analyse les conséquences de l'écriture d'un grafcet sur l'ensemble des situations que peut prendre le système, situations prévisibles ou non. Un formalisme en graphe d'états représente l'ensemble des situations que l'on peut atteindre dans l'hypothèse d'un fonctionnement normal, mais aussi tout ce qui correspond à des situations sur défaut. Cette démarche peut correspondre à un aspect « validation grafcet ».

Le Grafcet originel se veut être un outil de spécification des systèmes logiques, indépendant de toute réalisation. Fruit de son succès, il est aussi devenu un outil utilisé en conception, un outil d'aide à la maintenance et également, un outil d'aide à l'implantation. Le chapitre 6 montre qu'il existe une distance entre le modèle attendu du comportement, spécifié par Grafcet, et le comportement réel de la machine cible, qu'elle soit câblée ou programmée.

Enfin, le dernier chapitre présente, pour l'utilisateur, une facette importante qui est l'aspect application. Le premier exemple correspond à un système entièrement discontinu, dont tout le fonctionnement est représenté par des grafcets. Le second exemple porte sur l'utilisation du Grafcet pour la description des comportements séquentiels d'un processus mixte, à dominante continue.

Cet ouvrage permet au lecteur de se poser les bonnes questions, en lui apportant des éléments de réflexion, ainsi que des références précises.

Les propos ne développent que les concepts parfaitement reconnus par la communauté des automaticiens, mais ne prend pas position sur certains points non encore résolus (forçage de situations, ordres internes, ...).

Les auteurs

Alain BODART, Professeur Agrégé à l'IUT de SAINT-DENIS.

Véronique CARRÉ-MÉNÉTRIER, Maître de Conférences à l'Université de REIMS CHAMPAGNE ARDENNE.

Pierre DE LOOR, Maître de Conférences à l'ENI de BREST.

Jean-Bernard DELUCHE, Professeur Agrégé au lycée Raoul Dautry de LIMOGES.

Jacques DUPONT, Chef de Travaux Honoraire à l'ISIEB (Haute École Paul Henri Spaak) de BRUXELLES.

Dominique GENDREAU, Maître de Conférences à l'IUFM de BESANÇON.

Joël HANCQ, Chargé de Cours à la Faculté Polytechnique de MONS.

Alain KRIL, Professeur Agrégé à l'IUFM de CRETEIL.

Jean NIDO, Professeur Agrégé à l'IUFM de DOUAI.

Remerciements

Les auteurs remercient, pour leurs idées et leurs conseils, toutes les personnes qui ont effectué une relecture attentive de l'ouvrage.

Les auteurs remercient également, pour leur concours à l'élaboration des deux thèmes supports, les organisations suivantes :

- le CIPES – Château Sahler – F-25400 EXINCOURT.
- le Service de Thermique et d'Emploi des Combustibles, Faculté Polytechnique de Mons B-7000 MONS.

CHAPITRE 1

LE GRAFCET, UN OUTIL PARMI D'AUTRES

CHAPITRE 1
LE GRAFCET, UN OUTIL PARMI D'AUTRES

Cet ouvrage est consacré au Grafcet, modèle de spécification de la commande des systèmes automatisés par excellence. Cependant, le Grafcet n'est pas le seul prétendant à cette fonction et il est intéressant de faire le point sur sa place relativement aux autres modèles utilisés en Génie Automatique. Pour appréhender une telle présentation, il est utile de rappeler les notions de systèmes automatisés – donc de système – et de modèle de commande – donc de modèle -. L'objectif de la première partie de ce chapitre est de dégager les caractéristiques générales d'un modèle de commande de système automatisé de production. Les spécificités ainsi déterminées permettront, en deuxième partie, une comparaison entre le Grafcet et différents modèles de commande du Génie Automatique. Concevoir une automatisation, c'est aussi se préoccuper des phases en amont de la modélisation en prenant en compte des problèmes de mode de marche, de fonctionnement dégradé ..., et c'est aussi s'intéresser aux phases en aval en cherchant, par exemple, à valider la commande réalisée. Mais, ces derniers points ne sont pas le rôle traditionnel des modèles de commande. La troisième partie présentera des modèles complémentaires exploitables dans les phases d'analyse, d'élaboration ou de validation ...

... et comme : « aucune science ne peut être dignement comprise, sans son histoire essentielle ... » [1]*, le lecteur trouvera en fin de chapitre quelques références sur l'historique de l'automatique.*

1.1. Caractéristiques d'un modèle de commande d'un système automatisé

Pour définir le modèle de la commande d'un système automatisé, nous allons commencer par rappeler la notion de système telle qu'elle est définie en systémique. Nous préciserons ensuite la notion de système automatisé, pour ensuite cerner plus précisément leur commande. Nous effectuerons enfin une étude analogue concernant la notion de modèle pour définir clairement ce qu'est, ou ce que doit être, un modèle de la commande des systèmes automatisés.

1.1.1. Qu'est ce qu'un système ?

Le concept de système n'est pas très ancien, son origine remonte au début des années 1940. Un des précurseurs L. Von Bertalanffy [BER.93] proposa de définir un système comme un « ensemble d'unités en interrelations mutuelles ». Très vite, le champ d'application de la théorie s'élargit à la dynamique industrielle et de nombreux travaux se développent de part le monde. En France par exemple, Joël de Rosnay [ROS.77] assure la vulgarisation de ce concept nouveau et propose une définition complémentaire de la précédente en écrivant qu'un système est un *« Ensemble d'éléments en interaction dynamique, organisés en fonction d'un but »*. Il existe d'autres définitions qui viennent compléter celle-ci en intégrant par exemple, avec plus de netteté, les notions d'environnement, de sous-systèmes en interactions et de permanence [WAL.77].

Ces définitions conduisent à donner une description sommaire d'un système selon les deux points de vue structurel et fonctionnel [DUR.96]. Un système, sous son aspect structurel comprend alors :

- une frontière qui le sépare de son environnement,
- des éléments plus ou moins hétérogènes, qui peuvent être identifiés, dénombrés et classés,
- un réseau de liens qui réalise le transport soit des matières, soit de l'énergie, soit des informations,
- des zones « tampon » ou réservoirs dans lesquels sont stockés de la matière, de l'énergie, des produits, de l'information ...

S'agissant de son aspect fonctionnel, le système admet (Figure 1-1) :

- des flux de différentes natures : de matière, de produits, d'énergie, d'information ...
- des centres de décision qui reçoivent les informations et les transforment en actions,

1. Auguste Comte (1798 -1857) : philosophe et sociologue, énonce le principe de la classification des sciences, étonnamment proche de ce qui est devenu aujourd'hui la théorie générale des systèmes, ou la pensée systémique.

– des boucles de rétroaction qui permettent de tenir compte des résultats de ce qui se passe en aval pour contrôler au mieux l'évolution.

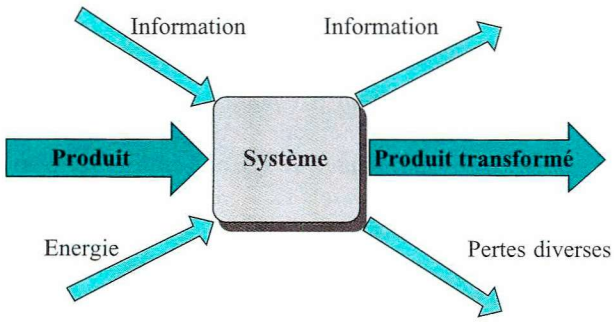


Figure 1-1 : entrées/sorties d'un système

Les interactions entre le système et son environnement viennent compléter cette description et constituent pour le système des entrées et des sorties qui peuvent être de trois natures différentes : matière, énergie et information. Pour prendre l'exemple simple d'un distributeur de boissons, les flux d'entrée et de sortie sont présentés dans le tableau de la figure 1-2.

Flux	Entrées du système	Sorties du système
Matière	produits lyophilisés, eau, gobelet, monnaie	boisson, monnaie
Energie	électricité	chaleur dissipée
Information	commande du client	afficheurs, voyants

Figure 1-2 :
les différents flux d'un distributeur de boissons

On recense des variables *continues* (variables énergétiques, eau); des variables *discrètes*[2] ou *numériques*[3] (stock des produits, monnaie, gobelets, afficheurs) et des variables *logiques* (commande client, voyants).

De manière plus générale, tout être vivant, tout mécanisme physique, tout organisme animal ou humain peut être considéré et étudié comme un système répondant à un certain nombre de lois générales. Mais, la classification de ces systèmes n'est pas unique. M.A Bunge [BUN.77] propose une typologie simple, à lire du bas vers le haut, où les trois derniers systèmes n'ont pu émerger qu'après constitution des systèmes précédents (Figure 1-3).

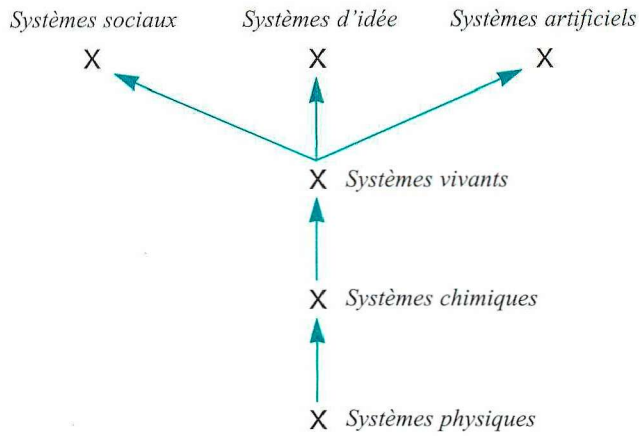


Figure 1-3 : typologie des systèmes selon M.A. Bunge

Le comportement de tout système dépend essentiellement de deux types de variables :

– les *variables de flux* qui s'expriment en terme de débit et qui sont donc dépendantes du temps,
– les *variables d'état* qui indiquent une accumulation et donnent une information sur la valeur quantitative des différents stocks ou des différentes réserves du système. Ces variables sont le résultat d'une intégration, par rapport au temps, des variables de flux.

Exemples de variables de flux : écoulement d'un liquide dans une canalisation, arrivée de véhicules à l'entrée d'une grande surface, naissances et décès dans une ville, dépôts et retraits sur un compte bancaire …

… et les variables d'état associées : quantité contenu dans un réservoir, nombre de places de parking occupées, population de la ville, état du compte …

Dans un système de transformation, il faut distinguer : des entrées qui sont fonction de l'influence de l'environnement sur le système; et des sorties, résultantes de l'action du système sur son environnement. Les entrées et les sorties sont liées par des relations de causalité et sont séparées par une durée. Il y a donc une dimension temporelle qui permet de distinguer *l'avant* et *l'après*.
Dans le paragraphe suivant, nous allons nous intéresser aux systèmes automatisés qui peuvent être vus dans cette classification comme des systèmes artificiels créés par l'homme.

2. Se dit d'une variation procédant par quantités entières (qualité du signal). Est à rapprocher du terme anglais *digital*. Un signal *tout ou rien* est un signal discret.
3. Représentation d'informations ou de grandeurs physiques au moyen de signaux à valeurs quantifiées (image du signal).

1.1.2. Qu'appelle-t-on un système automatisé ?

1.1.2.1. Composition d'un système automatisé

Un système automatisé est un système artificiel fabriqué par l'homme, devant remplir une ou plusieurs tâches particulières. Ces tâches peuvent être une transformation, une fabrication, voire un simple déplacement d'objets ou de personnes. Un élément caractéristique des systèmes automatisés est leur parallélisme de fonctionnement, car ils sont généralement constitués d'une multitude d'éléments évoluant en parallèle et interagissant entre eux. Ce parallélisme introduit une certaine complexité, liée à la multitude des possibilités d'évolution qu'il est rapidement impossible de gérer de façon simple et sûre. Un système automatisé peut donc être dangereux, et s'intègre dans un milieu industriel concurrentiel, demandant à la fois rapidité de développement et vision à long terme.

Les éléments d'un système automatisé peuvent être scindés en deux entités : la partie commande (P.C.) et la partie opérative (P.O.). La partie opérative agit directement sur les objets, « subissant » l'automatisation grâce à des éléments physiques appelés « effecteurs ». La partie commande est, quant à elle, de nature informationnelle et coordonne les évolutions des différents éléments de la P.O. Ainsi, elle envoie des ordres à la partie opérative et analyse les comptes-rendus fournis par la P.O. (Figure 1-4). Les informations qui circulent entre ces deux parties du système peuvent être de nature logique, numérique ou analogique.

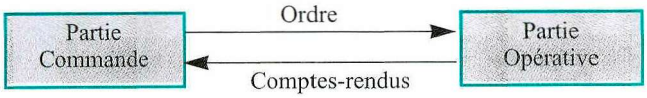


Figure 1-4 : éléments de bases d'un système automatisé

Les échanges s'effectuent à travers différents éléments constituant la « chaîne fonctionnelle » d'un système automatisé. Ces éléments sont présentés Figure 1-5.

- Les **effecteurs** qui dans le domaine industriel sont généralement des ensembles mécaniques agissant sur la matière (broche et outil d'une MOCN, essieux et roues d'un chariot, jet d'eau d'une machine de découpe ...).
- Les **actionneurs** (moteurs, vérins ...) qui utilisent une énergie (électrique, hydraulique ou pneumatique) nécessaire à transmettre les mouvements aux effecteurs.
- Les **pré-actionneurs** (relais, distributeurs simple et double effet, contacteurs, ...) qui marquent généralement la frontière entre la P.C et la P.O. et qui transforment des informations de commande en signaux de puissance.
- Les **capteurs** (codeurs, fins de course ...) qui convertissent en information des grandeurs physiques et qui témoignent de l'état de la P.O.
- Les **conditionneurs** (filtres, opto-coupleurs ...) qui mettent en forme les signaux en provenance des capteurs pour les adapter à la P.C.

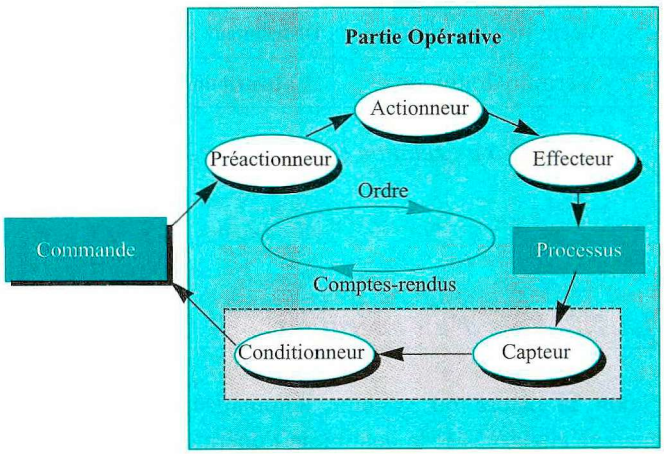


Figure 1-5 : la chaîne fonctionnelle

Dans les automatismes d'aujourd'hui, capteur et conditionneur sont souvent réunis dans un même boîtier. Le conditionnement du signal peut être intégré directement sur les cartes d'entrées d'un automate programmable (opto-coupleurs) ou bien géré par un protocole de transmission par l'intermédiaire de cartes coupleurs en cas d'entrées / sorties déportées[4].

Dans bien des cas, il est difficile de dissocier *effecteur* et *actionneur* ou *capteur* et *conditionneur*. Les schémas des Figures 1-6a, 1-6b et 1-6c donnent un aperçu des liens entre actionneur et pré-actionneur et entre grandeur mesurable et capteur.

4. De nombreux constructeurs proposent des « bus de terrain » qui permettent, grâce à un protocole de type réseau, de réduire la *connectique* dans le cas où l'installation possède un nombre important d'entrées / sorties.

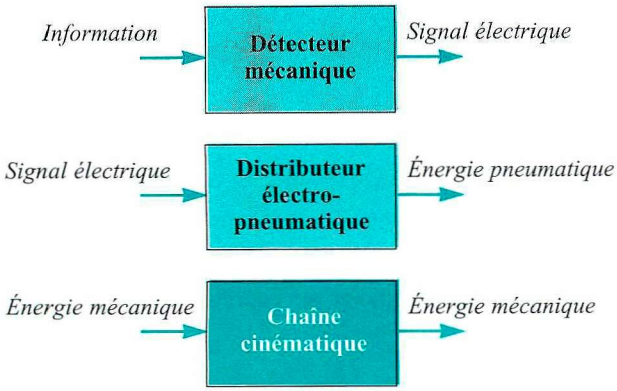


Figure 1-6 a : exemples de transformation de signaux

GRANDEUR	CAPTEUR
Position	**Fin de course à galet, à contact, Détecteur de proximité Codeur absolu, Capteur incrémental, Potentiomètre**
Vitesse	**Génératrice tachymétrique**
Accélération, Effort	**Jauge extensométrique, Accéléromètre**
Pression, Dépression	**Pressostat, Vacuostat**
Température	**Thermocouple, Bilame, Thermostat TOR**

Figure 1-6 c : relation grandeur/capteur

ACTIONNEUR	PRÉ-ACTIONNEUR
Brûleur à gaz, Jet d'eau	**Électrovanne**
Moteur électrique	**Contacteur, Variateur**
Vérin pneumatique	**Distributeur à tiroir ou à clapets**
Vérin hydraulique	**Distributeur, Servovalve**

Figure 1-6 b : relation actionneur/pré-actionneur

1.1.2.2. Rôle d'un opérateur

Selon la nature du système automatisé, les modes de marche envisagés et la qualité de l'opérateur, celui-ci peut intervenir sur le système de plusieurs façons (Figure 1-7).

- Il communique avec la P.C. pour la conduite de l'installation (pupitre opérateur, supervision ...).
- Il agit sur les éléments de la P.O. en phase de réglage ou intervient directement sur le processus en phase de chargement/déchargement (voir application n° 1) ou en phase d'exploitation si un mode de marche l'impose (mode semi-automatique, traitement des défauts, marche dégradée de l'installation ...).

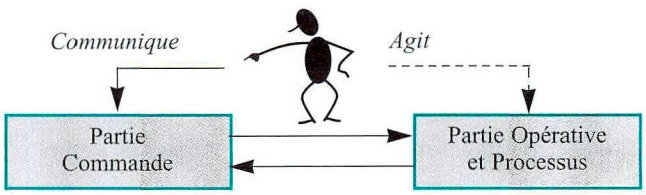


Figure 1-7 : les interactions Opérateur/Système

1.1.3. Grandeurs et prise en compte du temps

Un système est constitué par un ensemble de variables évoluant dans le temps. La nature du système va dépendre :

- du type des variables utilisées : continues, numériques ou « Tout ou Rien » (TOR),
- de la manière de prendre en compte le temps (continu ou discret).

Exemple : pour un circuit électronique, la prise en compte du temps sera continue ou discrète selon que les informations seront, ou non, cadencées par un signal d'horloge ; pour les réalisations câblées pneumatiques ou électriques le temps est continu et les éventuels retards temporels et asynchronismes sont dus aux temps de réponse des composants et aux pertes de charge dans les circuits. Pour une réalisa-

tion programmée, la prise en compte du temps sera toujours discrète, les opérations internes seront cadencées à la fréquence d'une horloge et les échanges avec l'extérieur pourront s'effectuer soit par interruptions, soit par un protocole asynchrone ou synchrone de traitement des entrées/sorties.

Dans un système analogique, les informations sont des grandeurs continues dans le temps même si, de plus en plus souvent, les ordinateurs traitent de façon quasi continue des informations codées sous forme binaire. C'est en particulier le cas des *systèmes numériques* où les variables continues sont échantillonnées (Machines-Outils à Commande Numérique, Robots, ...). Dans un cas comme dans l'autre ces systèmes appartiennent au domaine des *asservissements* et de la *régulation*[5].

Un système logique est composé d'un ensemble de variables de type « Tout ou Rien ». On peut distinguer d'une manière simple deux types de logique :

- La logique combinatoire où chaque sortie du système est le résultat direct d'une combinaison des variables d'entrée.

$$S = f(E)$$

- La logique séquentielle, où les sorties sont fonction des entrées et de l'état interne du système (notion de séquence d'entrées et de mémorisation).

Deux cas sont à distinguer :

$$X = f(E, X) \quad S = g(E, X) \quad (a)$$

ou

$$X = f(E,X) \quad S = g(X) \quad (b)$$

avec : *E : vecteur d'entrée,*
S : vecteur de sortie,
X : vecteur d'état.

Quel que soit le cas envisagé, le vecteur d'état, à un instant *« t »*, sera fonction :

– de son état antérieur à l'instant *« t –1 »*,
– de l'état du vecteur d'entrée à ce même instant.

Dans tout système séquentiel, il y aura donc un *aspect temporel* qu'il faudra prendre en compte (voir Figure 1-8).

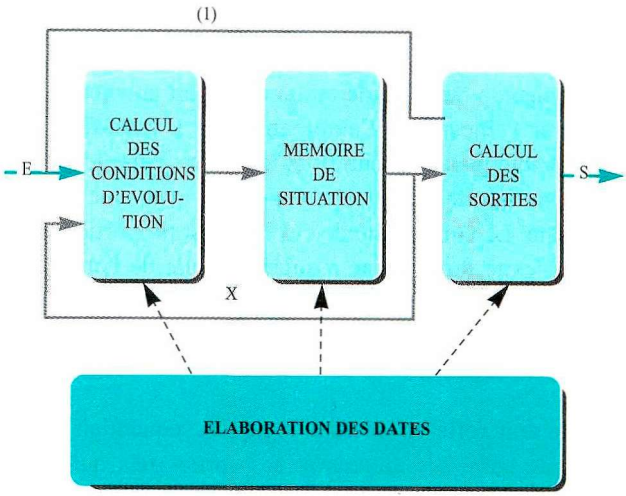


Figure 1-8 : représentation du traitement des variables pour une logique séquentielle

Dans cette figure, la présence ou non de la liaison (1) fera que l'on se placera dans le cas *(a)* ou *(b)*.

L'aspect temporel sera souvent une source de difficultés pour la réalisation de l'automatisme et il conduira à un certain aménagement des études théoriques, ce qui entraînera :

- *Pour les systèmes câblés asynchrones ;* à la prise en compte du temps de commutation des composants qui génère une discontinuité du signal et donc une incertitude d'état. Ce problème entraînera inévitablement une distance entre le réel de l'application câblée et le modèle élaboré pour son étude (un bon exemple est donné par le séquenceur pneumatique qui ne permet pas d'assurer technologiquement la simultanéité écrite dans la règle 3 du Grafcet). Cette difficulté peut être levée par l'emploi de circuits synchrones.

- *Pour les systèmes programmés ;* au respect de certaines règles d'écriture et de techniques de prise en compte des entrées (voir chapitre 6).

Le chapitre 2 montrera que les actions conditionnelles du modèle Grafcet le rendent conforme au premier cas envisagé. Sur la Figure 2-30, l'expression de la sortie A est donnée par l'équation : A = X12. a

5. Sous-ensemble des asservissements où la consigne est stable dans le temps.

1.1.4. Qu'appelle-t-on commande d'un système automatisé ?

La commande du système automatisé doit amener celui-ci à réaliser l'objectif de l'automatisation. C'est-à-dire gérer les liens logiques, séquentiels et temporels entre les entrées et les sorties du système automatisé, avec une sécurité maximale. La complexité de ces liens est proportionnelle à la complexité du système associée à celle de l'objectif de l'automatisation. Il est donc possible d'énumérer les principales caractéristiques que doit posséder la commande d'un système automatisé :

- **Elle doit refléter les liens** logiques, séquentiels et temporels entre ses entrées et ses sorties tels qu'ils sont désirés par l'automaticien.
- **Elle doit supporter la notion de parallélisme** inhérent aux systèmes automatisés.
- **Elle doit être réactive,** pour pallier toute évolution attendue ou non du système commandé. La réactivité, qui implique que la commande est en perpétuelle attente d'un événement auquel elle peut répondre immédiatement, contribue à la sécurité de l'automatisation.
- **Elle doit être déterministe :** son comportement doit être unique et prévisible pour tout scénario d'évolution de la partie opérative. Seule une commande déterministe peut garantir à un automaticien, un lien entre ce qu'il prévoit lors de la conception de la commande et le comportement final issu de l'automatisation.

1.1.5. Qu'est-ce qu'un Modèle ?[6]

Un modèle est l'abstraction d'une entité, nécessaire et suffisante, pour atteindre un objectif donné. Cette notion est illustrée par la figure suivante (Figure 1-9) où, selon l'objectif à atteindre, le schéma original pourra être représenté selon différents modèles.

Le modèle est ici une « image » du réel et non pas l'original comme le modèle de l'artiste. Cette représentation est souvent simplifiée ou réduite entraînant une distance, dans la représentation, entre le modèle et le réel ce qui justifie la notion de *« degré d'abstraction »*.

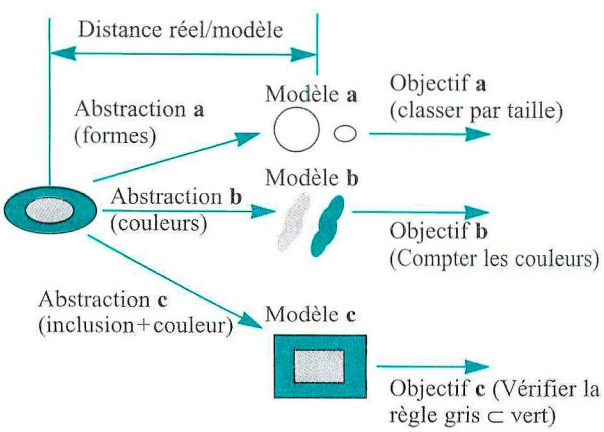


Figure 1-9 : notion de Modélisation

Ainsi selon le degré d'abstraction, on peut parler aussi de *hauteur de vue* en prenant garde de ne pas confondre avec les *angles de vue* mentionnés au chapitre 3. Selon la durée d'observation, un phénomène discontinu (circulation de pièces dans un atelier, véhicules sur une route, ...) peut être modélisé de façon continue si l'intérêt de l'étude l'exige comme par exemple si ce sont les différents flux et débits du système qui sont pertinents.

Dans le cas des modèles *dynamiques,* les lois d'évolution du modèle sont voisines de celles du système et l'on peut en regardant le modèle, s'informer sur l'évolution du réel.

L'outil de modélisation contient des *entités* (ou des *objets*) qui sont ses éléments structurels et des *relations*. Entités et relations sont caractérisées par des *attributs*, fixes ou variables qui, dans le cas d'un modèle dynamique, permettent l'évolution des *variables d'état* associées au modèle.

Un modèle est le plus souvent constitué par :

- un schéma et des règles de fonctionnement et/ou de décisions exprimées sous forme littérale,
- des *expressions logiques ou algébriques* contenant les différentes *variables d'état* qui caractérisent le système.

6. Le terme modèle est bien souvent ambigu et l'on prendra garde de ne pas faire de confusion entre le modèle « outil » qui sert à la *description* et le modèle « résultat » qui s'attache à la *représentation* du système. Le Grafcet souffre aussi de cette ambiguïté.

Pour prendre le cas du modèle Grafcet : les étapes, les transitions, les actions en sont les entités ; les liaisons orientées, l'alternance étapes/transition, les correspondances étapes / actions en sont les relations. Les états d'étapes et les réceptivités sont respectivement les attributs des étapes et des transitions, tandis que les cinq règles d'évolution augmentées des postulats temporels décrivent le « fonctionnement dynamique » du Grafcet.

En fonction de l'intérêt porté à tout ou partie du réel, plusieurs modélisations d'un même système peuvent être envisagées suivant divers « points de vue » (voir chapitre 3). On choisit, selon les cas, le modèle le plus pertinent ou le plus « exact ».

Exemple : Modélisation d'une bille de roulement à l'aide de différents modèles dont certains sont plus ou moins pertinents :

Modèle *mathématique,* par une équation :

$$x^2 + y^2 + z^2 = r^2 \quad \text{ou} \quad V = 4/3\ \pi\ r3$$

Modèle *physique,* par l'expression d'une des caractéristiques du réel :

sphère d'acier de diamètre 2R.

Modèle *géométrique,* par une définition :

lieu des points de la surface enveloppe situés à une même distance d'un point.

Modèle *technologique :*

dessin technique 2D ou **3D.**

Modèle *artistique :*

dessin en perspective ombrée et coloriée.

Un seul modèle ne suffit jamais à représenter le réel avec précision, on envisage alors la combinaison de plusieurs modèles entre eux.

Ainsi pour l'exemple, seuls le modèle technologique et le modèle physique renseignent sur la matière mais aucun modèle ne donne une idée du comportement de la bille (rebond, roulement avec ou sans glissement, ...).

1.1.6. Notion de modèle de commande de système automatisé

Le modèle de la commande d'un système automatisé doit permettre de refléter toutes les caractéristiques d'une commande énumérée au paragraphe 1.1.4. :

- causalité entre les entrées et les sorties,
- parallélisme,
- réactivité,
- déterminisme.

De plus, dans un contexte industriel concurrentiel, un tel modèle doit permettre de développer rapidement et clairement les spécifications d'une commande qui peut être très complexe et également garantir à l'utilisateur la pérennité des modèles établis. Il doit donc être explicite et très facilement lisible et/ou modifiable. En résumé, un modèle de commande répondant aux critères énumérés précédemment, conviendra d'autant plus, qu'il possédera les atouts suivants :

- posséder une syntaxe claire et précise, si possible graphique,
- modéliser simplement des comportements complexes,
- faire l'objet d'une norme,
- permettre un passage rapide vers l'implantation de la commande décrite.

1.1.7. Le Grafcet[7] est-il un bon modèle de commande des S.A.P. ?

Un grafcet[7], est un modèle, donc une abstraction. L'objet de cette abstraction est un cahier des charges relatif à une partie opérative. Une comparaison entre les caractéristiques qu'un modèle de commande doit respecter et celles du modèle Grafcet, permet d'affirmer que ce dernier est approprié. En effet :

- Le Grafcet exprime le rapport de causalité entre les entrées et les sorties d'un système à l'aide des réceptivités, des actions associées aux étapes, et des règles d'évolution. Notons également qu'un nombre quelconque d'entrées/sorties peuvent être prises en compte. Une des lacunes du Grafcet, relativement à la commande d'un système automatisé, est l'absence de possibilité de représentation d'interactions de type analogique avec la partie opérative. Il faut savoir que certaines équipes de recherche travaillent à l'intégration de ce type d'entrée/sortie.

7. On écrira GRAFCET en lettres capitales ou Grafcet (avec un grand « G ») lorsqu'il s'agira du *modèle* outil et grafcet (avec un petit « g ») dans tous les autres cas.

- Le parallélisme est « illimité » puisque un nombre quelconque de séquences Grafcet peuvent évoluer en même temps.
- La réactivité est garantie par une causalité à temps nul et une prise en compte immédiate des entrées.
- La règle 4, indiquant que plusieurs transitions simultanément franchissables sont franchies simultanément contribue à son comportement déterministe.

De plus, le Grafcet possède certains des atouts énumérés au paragraphe 1.1.5., relatifs à la puissance et à la simplicité de modélisation. Le cahier des charges indique généralement implicitement les causalités entre les entrées et les sorties qui peuvent parfois être très complexes et très floues. L'aspect graphique du Grafcet a l'avantage de clarifier le cahier des charges et de rendre celui-ci très lisible et explicite. Par exemple, la situation d'un grafcet à un instant donné renseigne très facilement l'utilisateur sur l'état du système en cours de fonctionnement. La sélection de séquences ou les séquences simultanées permettent de représenter des comportements complexes, impliquant des synchronisations et des choix qui doivent être faits à des instants particuliers. Notons également que l'utilisation du forçage permet de modéliser plus simplement une commande complexe en hiérarchisant les tâches qui peuvent être effectuées. De même, le Grafcet fait l'objet d'une norme [IEC.88], à laquelle peuvent se référer tous les concepteurs de toutes les entreprises. Enfin, il existe, une norme sur les langages de programmation des A.P.I. [NFE.93], qui comprend une primitive de structuration SFC (Diagramme Fonctionnel en Séquence) basée sur la syntaxe du Grafcet. Dans de nombreux cas, le passage d'un grafcet à ce langage peut être effectué très naturellement (tout en prenant garde à son interprétation !).

Tous ces éléments font que le Grafcet est couramment employé dans l'industrie. De plus, il peut être utilisé dans toutes les étapes du cycle de vie du produit (voir figure 1-10). Mais, selon la phase pour laquelle il est employé, le Grafcet possède certaines lacunes et présente certaines imprécisions qui seront détaillées tout au long de cet ouvrage.

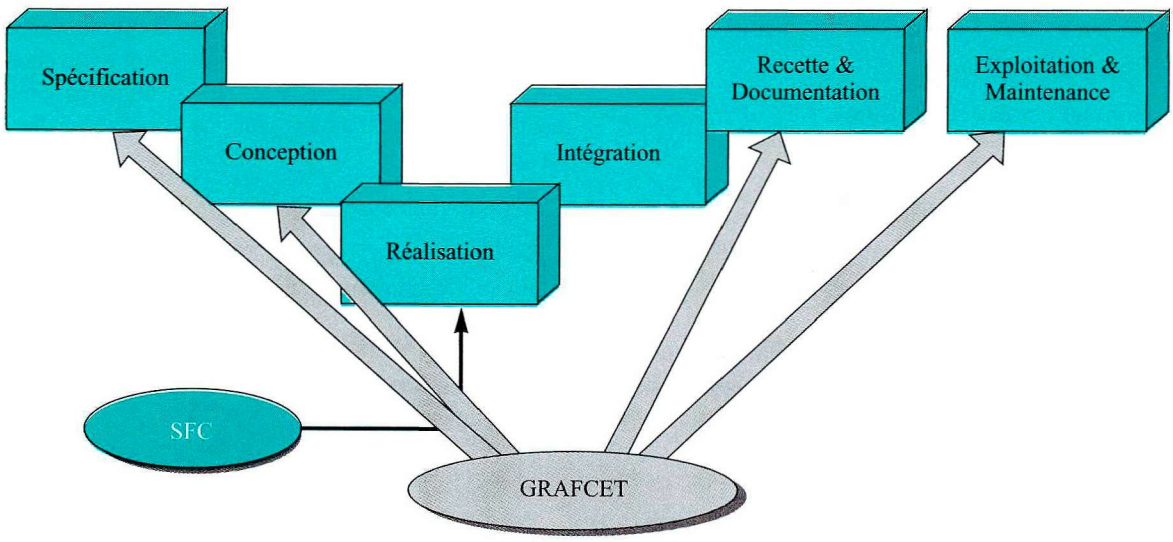


Figure 1-10 : place du Grafcet dans le cycle de vie de l'équipement automatisé.

Nous verrons, entre autre, que sa normalisation est le fruit d'une longue concertation dont le résultat est un compromis entre différentes options, sans en satisfaire entièrement une seule (chapitre 2).

Dans le chapitre 4, nous découvrirons des pistes de réflexions concernant l'élaboration d'un grafcet car, il n'existe pas de guide de construction unique qui permettrait d'aboutir à un modèle de commande correct et cohérent.

Le chapitre 5 montrera la difficulté d'identifier le comportement effectif d'un grafcet à des fins de validation et le chapitre 6 présentera les difficultés pour obtenir une équivalence entre le modèle de spécification Grafcet et son implantation dans un système réel.

1.1.8. Les étapes de la modélisation

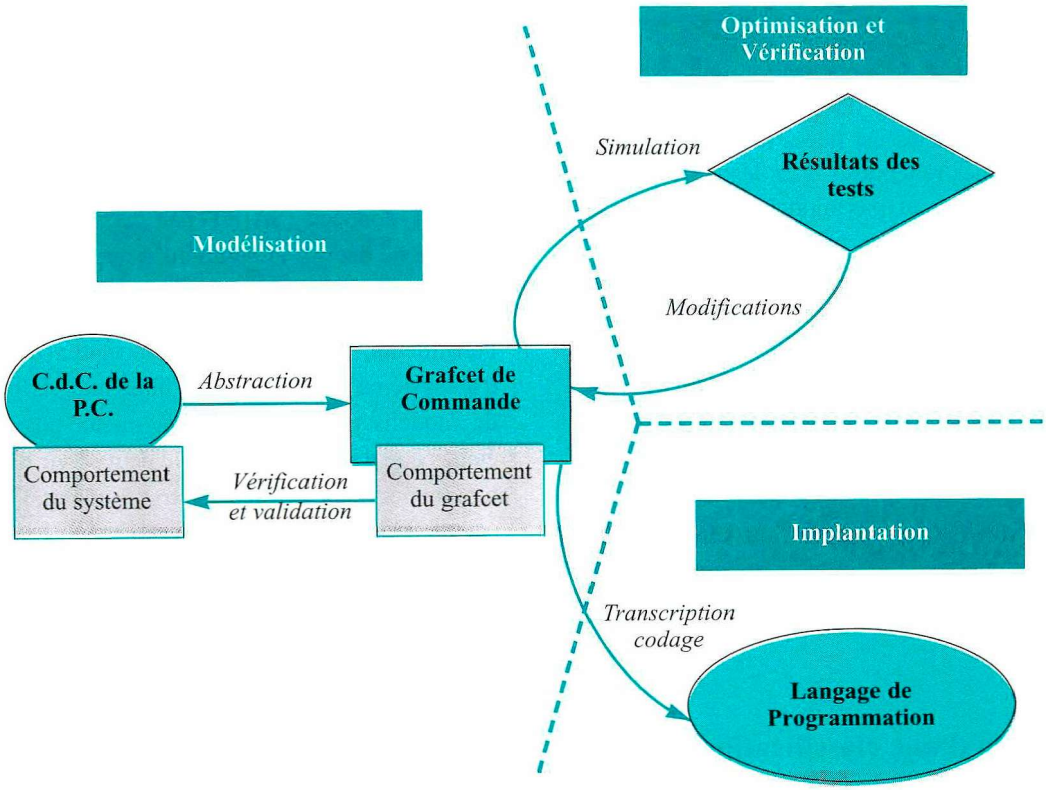


Figure 1-11 : de la modélisation à l'implantation

La Figure 1-11 présente les différentes étapes de la modélisation. Après le choix de l'outil de modélisation, l'abstraction, première étape de cette modélisation, consiste à créer un modèle de l'application à partir du cahier des charges de la partie commande. Cette démarche sera différente selon que l'on se placera en phase de conception, où le réel est encore virtuel, ou que l'on s'inscrira dans une phase de rétro-conception où le réel est bien réel !

Le modèle une fois constitué, l'étape de vérification et de validation, permet de s'assurer que la représentation effectuée correspond bien aux attendus du modélisateur. On vérifie ainsi que le comportement décrit par le grafcet conçu correspond au comportement attendu du système à modéliser.

Cette boucle abstraction / validation constitue donc la démarche de modélisation. Le modélisateur sera conduit à faire autant d'allers retours que nécessaires jusqu'à ce que l'objectif visé soit atteint.

La modélisation effectuée, l'étape d'optimisation permet, à partir de scénarios fixés, de procéder à des tests permettant de vérifier le bien fondé de certains choix ou de vérifier la compatibilité de certaines actions entre elles (voir chapitre 5). Par exemple, dans le cas de système de production flexible, la simulation est souvent l'étape qui permet d'optimiser une fabrication en guidant le concepteur pour le choix d'une politique de lancement, pour l'implantation des postes de travail et pour l'établissement des règles de priorité dans la transitique entre postes.

Enfin, la phase d'implantation, permet d'appliquer sur le réel, par l'intermédiaire d'un langage spécifique (voir chapitre 6) à la partie commande, les résultats de la modélisation.

1.2. Le Grafcet face à d'autres modèles des S.A.P.

1.2.1. Pourquoi existe-t-il différents modèles de commande et de spécification ?

Le Grafcet n'est pas l'outil de modélisation universel pour la description de la commande des systèmes automatisés. L'existence d'autres modèles est liée à la multiplicité des catégories de problèmes rencontrés dans les systèmes. Par exemple, le Grafcet ne peut pas modéliser un processus continu. De plus, pour un même problème, il existe différentes manières de l'aborder selon l'objectif de description ou l'angle de vue souhaités (description du comportement, représentation des données, spécification fonctionnelle, implantation, ...) et également selon la culture du concepteur ou selon des critères économiques que nous n'aborderons pas ici.

Ces différents modèles de commande et de spécification possèdent des caractéristiques propres qui sont à rapprocher des caractéristiques énumérées au paragraphe 1.1.5. Ils coexistent et se combinent entre eux pour faciliter la modélisation d'un processus complexe. En effet, prenons le cas des systèmes flexibles de production qui entraînent de très fortes contraintes sur la commande. Ils sont très souvent représentés par l'utilisation conjointe d'un modèle structurant les données (SA-RT par exemple) et d'un modèle capable de décrire le parallélisme et permettant la simulation (Réseau de Petri ou Grafcet).

Par ailleurs, la démarche de conception d'une commande d'un système automatisé peut ainsi intégrer plusieurs outils de modélisation, chacun étant mieux adapté à certaines étapes que d'autres. Un modèle peut servir d'élément structurant pour un ou plusieurs autres modèles. C'est souvent le cas de SADT et du GEMMA par rapport au Grafcet (voir Chapitre 4), qui lui-même peut être amené à structurer une application écrite dans un langage littéral (voir Chapitre 6).

1.2.2. Proposition d'une classification

Vouloir classer les modèles est une opération délicate qui fait appel à l'arbitraire. Plusieurs classements différents peuvent être établis, par exemples, selon la nature de l'outil de modélisation, ou selon l'objectif de description ou encore selon la nature du système à modéliser, ou bien selon la sensibilité de chacun.

Il est possible de distinguer des outils de modélisation *statiques* (où aucune notion de temps n'intervient), *cinématiques* (ou temporels) et *dynamiques* (qui incluent la notion d'état) ; cette classification privilégie la nature de l'outil de modélisation.

Une partition peut être faite entre les modèles *procéduraux* (Grafcet, organigramme, ...) et les autres.

On peut aussi classer les modèles par leur spécificité et distinguer ainsi les modèles à dominante *fonctionnelle*, ceux à dominante *technologique* ou encore ceux réservés à la *validation*.

Aucune littérature ne reconnaît un classement universel. Ainsi, nous proposons (figure 1-12) un classement des modèles parmi les plus utilisés dans le domaine du Génie Automatique[8]. Ce classement distingue les outils par rapport à leur objectif de description, ce qui constitue la première interrogation d'un concepteur lorsqu'il doit choisir un outil de modélisation pour un problème donné. On notera que certains outils s'intéressent uniquement aux fonctions, que d'autres considèrent les données et leurs traitements et que d'autres encore représentent les états du système. Enfin, certains font l'objet d'une norme (française, européenne ou internationale).

8. Le Génie automatique a été défini par J.-P. Frachet (1987) comme le champs d'étude couvert par les activités de conception et d'exploitation des systèmes industriels automatiques.

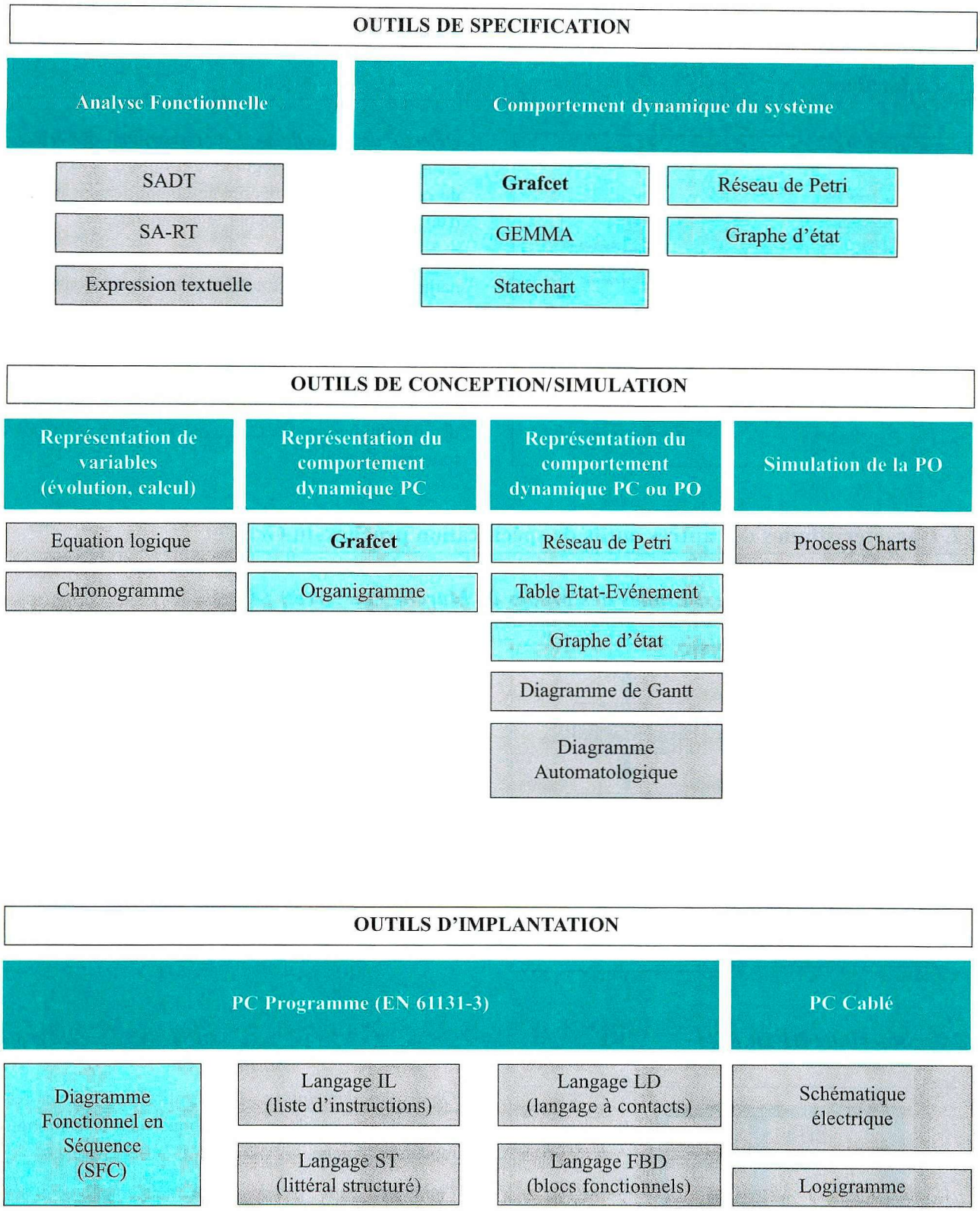
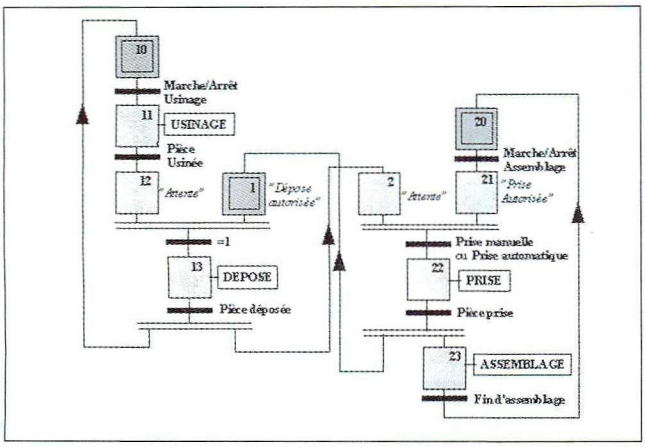


Figure 1-12 : une proposition de classement des outils de modélisation[9], selon leur objectif de description

9. Les cadres à dominante vert clair correspondent aux outils comparables au Grafcet, soit dans leur forme, soit dans leur utilisation, soit dans la nature des problèmes qu'ils permettent de résoudre.

1.3. Le Grafcet et les autres outils de modélisation

1.3.1. Le Grafcet



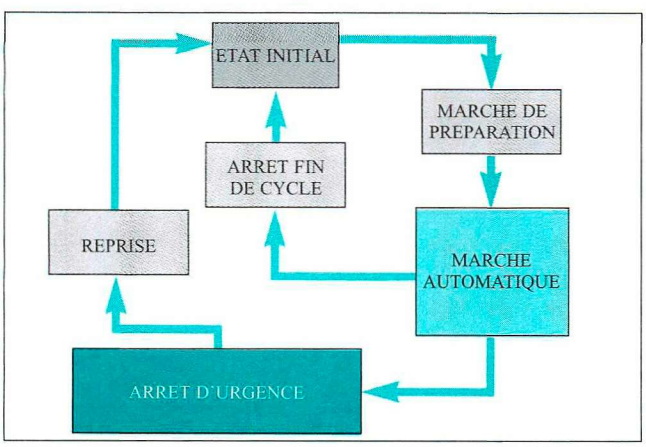
Objectif de description : représentation du cahier des charges d'un système logique. Cet outil de spécification et de conception sert à décrire le comportement dynamique d'un système et/ou de sa partie commande.

Limite de l'outil : uniquement adapté aux systèmes de nature séquentielle, ses entrées et ses sorties sont réduites à des variables booléennes.

Position par rapport aux autres outils : il trouve sa place à tous les endroits de la chaîne de conception d'un système de commande. En implantation, il peut se décliner en langage de programmation (S.F.C.) ce qui lui donne aussi un caractère opérationnel.

1.3.2. Caractéristiques des autres outils de spécification proches du Grafcet

1.3.2.1. Le GEMMA (Guide d'Etudes des Modes de Marche et d'Arrêt) [ADE.82]

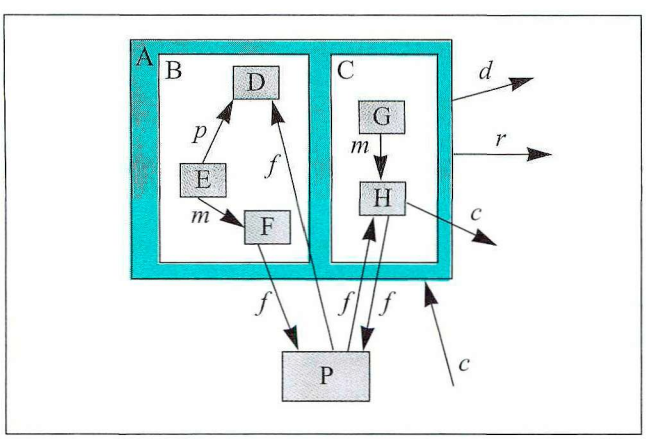


Objectif de description : représentation graphique d'états d'un système automatisé, correspondant à ses différentes configurations de modes de marche et d'arrêt.

Limite de l'outil : cette grille pré-formatée, qui prévoit un nombre limité de cas, n'est adaptée qu'à une configuration mono partie commande.

Position par rapport au Grafcet : contrairement au Grafcet, la construction d'un GEMMA repose sur une structure déjà établie, ce qui règle tout problème de syntaxe. Le GEMMA constitue un cadre de réflexion qui peut, le cas échéant, servir à l'élaboration d'un grafcet de modes de marche.

1.3.2.2. Statechart [HAR.87]

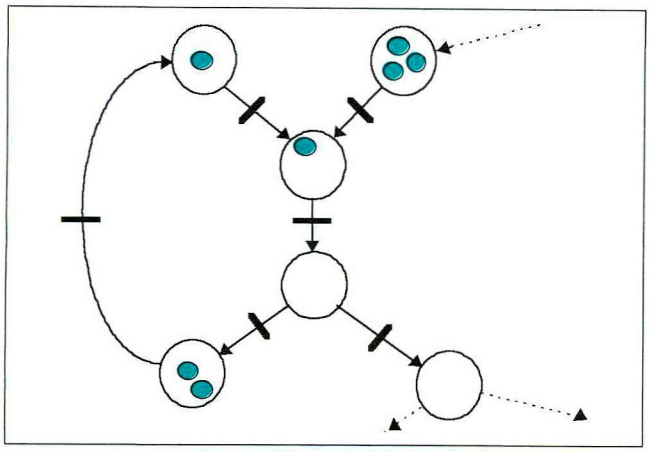


Objectif de description : spécification de systèmes réactifs complexes hiérarchisés. S'applique bien à la gestion des modes de marche.

Limite de l'outil : pas de norme, mais graphique et sémantique rigoureuse. Difficulté d'interprétation du synchronisme.

Position par rapport au Grafcet : très répandu dans le domaine du génie logiciel; activation/désactivation des macro-tâches moins fine que la notion de forçage en Grafcet.

1.3.2.3. Le réseau de Petri [DAV.92]

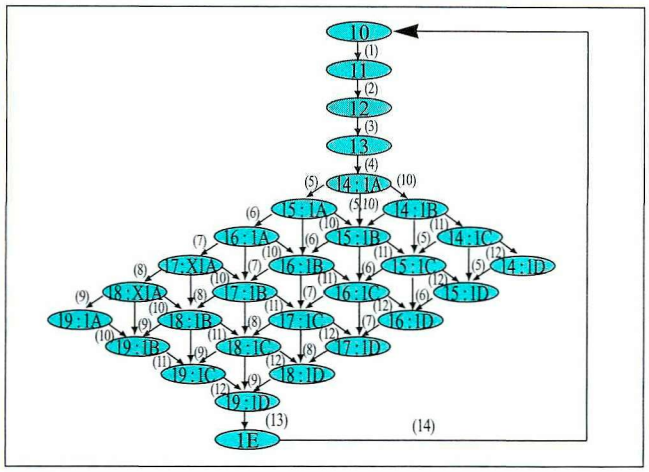


Objectif de description : spécification, conception et simulation des systèmes automatiques pouvant représenter la partie commande comme la partie opérative.

Limite de l'outil : non normalisé, il possède de nombreuses déclinaisons ; toutes ses variantes (réseaux colorés, probabilistes, ...) rendent cet outil de modélisation très puissant pour les systèmes complexes, mais conceptuellement difficile à maîtriser. Le R.d.P. interprété est comparable au Grafcet.

Position par rapport au Grafcet : semblable au Grafcet dans son objectif et sur sa forme graphique, le R.d.P. est non déterministe.

1.3.2.4. Le graphe d'état



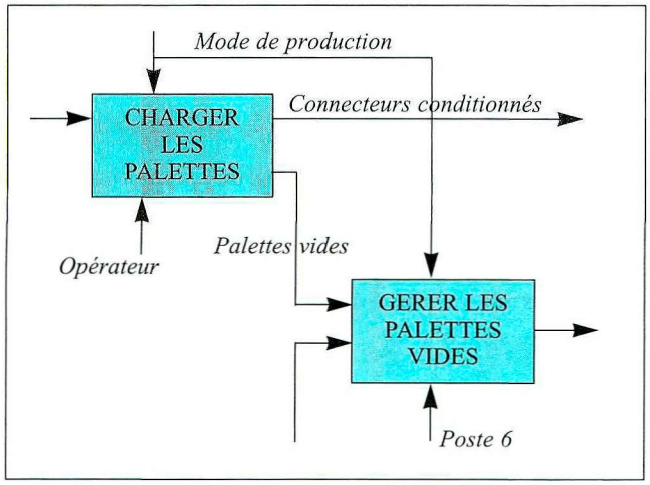
Objectif de description : outil de spécification ou de validation, permettant la représentation exhaustive de l'ensemble des états que peut prendre le système en toute circonstance (fonctionnement normal ou non).

Limite de l'outil : lisibilité parfois très difficile dans le cas d'une modélisation comportant une explosion combinatoire d'états.

Position par rapport au Grafcet : peut servir de complément utile au Grafcet afin de vérifier la cohérence de certaines situations prévues par le concepteur ou détecter certains comportements imprévus.

1.3.3. Position des autres outils de spécification par rapport au Grafcet

1.3.3.1. SADT (actigramme) [IGL.89]

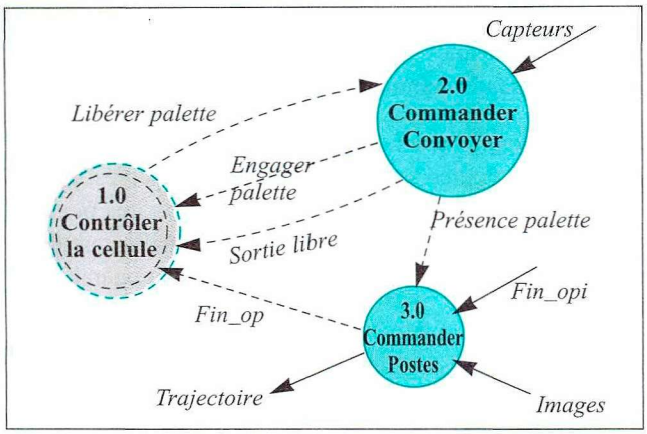


Objectif de description : analyse fonctionnelle des systèmes complexes par représentation hiérarchisée des fonctions et des données qui s'y rattachent, en particulier les flux de produits et d'informations.

Limite de l'outil : s'attache à décrire les fonctions sans se préoccuper du comportement, c'est-à-dire du comment elles se réalisent.

Position par rapport au Grafcet : complément idéal en phase de spécification ; permet d'analyser et de structurer les applications complexes et/ou volumineuses.

1.3.3.2. Le diagramme SA-RT [WAR.85]



Objectif de description : documentation riche et cohérente de la nature et des flux d'informations du système étudié.

Limite de l'outil : nombreuses déclinaisons du modèle ; ne permet le passage à la simulation, voire à l'implantation, que couplé avec un autre modèle.

Position par rapport au Grafcet : en amont, lorsque la complexité de l'application exige une étude approfondie des échanges entre différentes parties commandes.

1.3.3.3. L'expression textuelle

....Le manipulateur exerce, par son vérin vertical, un mouvement de descente « 11 », puis saisit la vis dans la position basse à l'aide d'une pince « 12 » actionnée par un ensemble pneumatique.

La vis est alors dégagée du tiroir « 13 » par remontée du vérin vertical et transférée au-dessus du plateau par la sortie du vérin horizontal « 14 »...

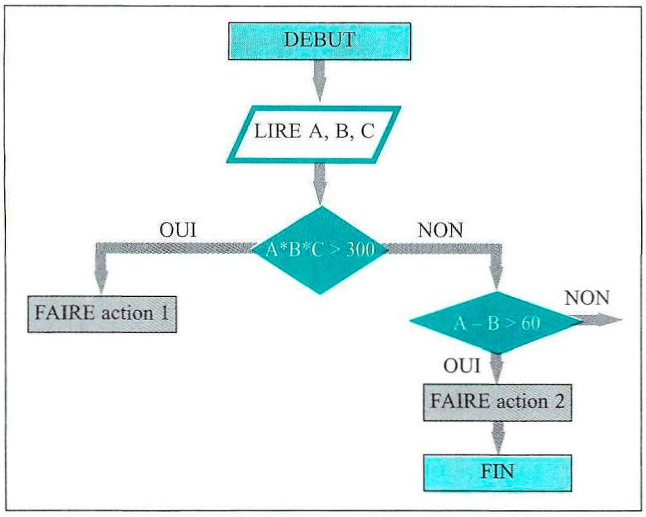
Objectif de description : description universelle de tous les systèmes et phénomènes dans tous les domaines, ce qui en fait souvent un outil incontournable.

Limite de l'outil : manque de vision globale ; imprécisions ou malentendus selon la culture technologique du spécificateur et de l'utilisateur ; description souvent lourde et traduction délicate dans une langue étrangère.

Position par rapport au Grafcet : permet d'apporter des compléments au Grafcet comme à n'importe quel autre outil pour préciser les points importants ou éclaircir des situations complexes.

1.3.4. Caractéristiques des autres outils de conception/simulation proches du Grafcet

1.3.4.1. L'organigramme [NFZ.75]



Objectif de description : représentation graphique d'un algorithme de commande de processus ; issu du domaine informatique il privilégie la représentation des données et de leur traitement.

Limite de l'outil : ne permet pas la représentation de processus parallèles mais s'adapte bien à une transcription dans un langage de programmation.

Position par rapport au Grafcet : parfois comparable au Grafcet, il s'attache plus à décrire le traitement des données que l'état du système.

1.3.4.2. La table états – événements

Etat / Événem	Etat 1 : Arrêt rotation	Etat 2 : Rotation sens +	Etat 3 : Rotation sens -
↗arrêt	1	2	3
↑arrêt	1	1	1
↘arrêt	1	-	-
↓arrêt	1	-	-

Objectif de description : représentation des différents états d'un système et des évolutions possibles en fonction des événements qui peuvent survenir; description utile en phase de maintenance.

Limite de l'outil : la combinatoire des entrées rend ces tableaux démesurément grands et ne permet ainsi que la représentation partielle d'un système.

Position par rapport au Grafcet : ne permet pas la bonne représentation de la dynamique d'un système, en revanche, il prend en compte, de manière exhaustive, tous les événements possibles.

1.3.5. Position des autres outils de conception / simulation par rapport au Grafcet

1.3.5.1. L'expression logique

$$\mathbf{M = \neg a \wedge (m \vee M)}$$

ou encore

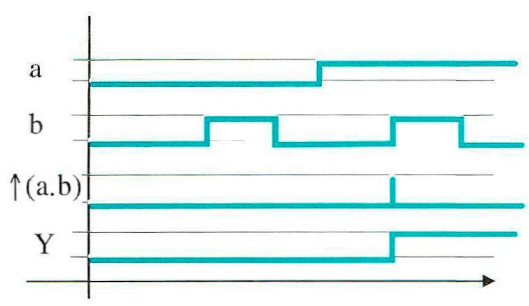
$$\mathbf{M = \bar{a}.(m + M)}$$

Objectif de description : représentation combinatoire de systèmes logiques, sous forme de fonctions de variables.

Limite de l'outil : représentation possible de systèmes séquentiels mais manque de lisibilité due à l'absence de description dynamique.

Position par rapport au Grafcet : une des composantes du Grafcet pour la représentation des éléments combinatoires (fonctions booléennes des réceptivités et des actions conditionnelles); de plus il peut être sa traduction en phase d'implantation (calcul des sorties, ...).

1.3.5.2. Le chronogramme

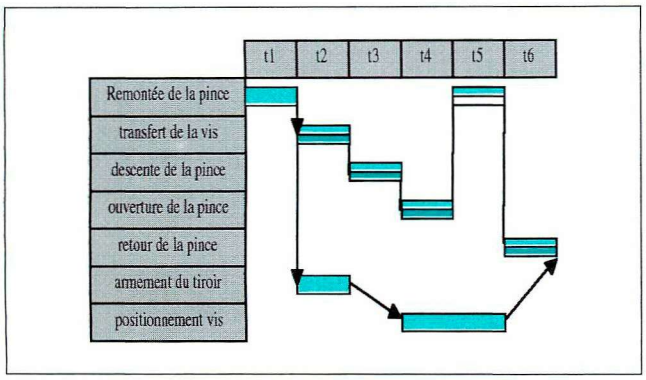


Objectif de description : représentation de l'évolution des variables d'un système et de leurs synchronisations; permet de mettre en évidence les relations de cause à effet des différentes variables entre elles à partir d'un scénario fixé.

Limite de l'outil : outil seulement utile à la visualisation du comportement du système, vu au travers de l'évolution de ses variables.

Position par rapport au Grafcet : permet de visualiser un comportement spécifié en Grafcet par représentation des variables d'entrée, de sortie et des variables internes.

1.3.5.3. Le diagramme de Gantt

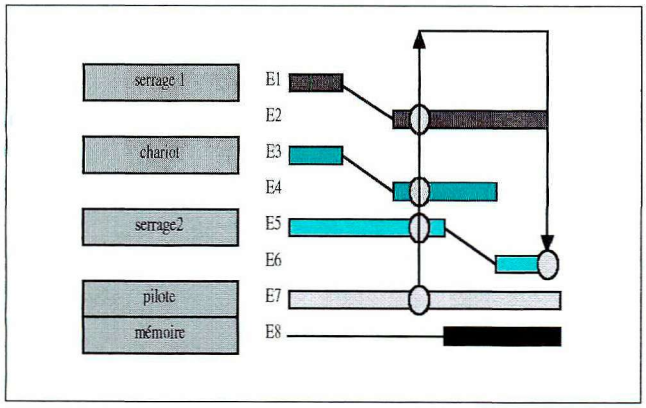


Objectif de description : représentation temporelle des tâches d'un système permettant de mettre en évidence leur durée et leurs synchronisations pour tous les domaines où le temps est évalué de manière continue.

Limite de l'outil : difficulté pour la représentation des systèmes comportant des reprises de séquence ; aucune représentation de l'état du système.

Position par rapport au Grafcet : en phase d'optimisation, permet le calcul du temps de cycle pour la mise en évidence des tâches critiques.

1.3.5.4. Le diagramme automatologique [T&F.93]



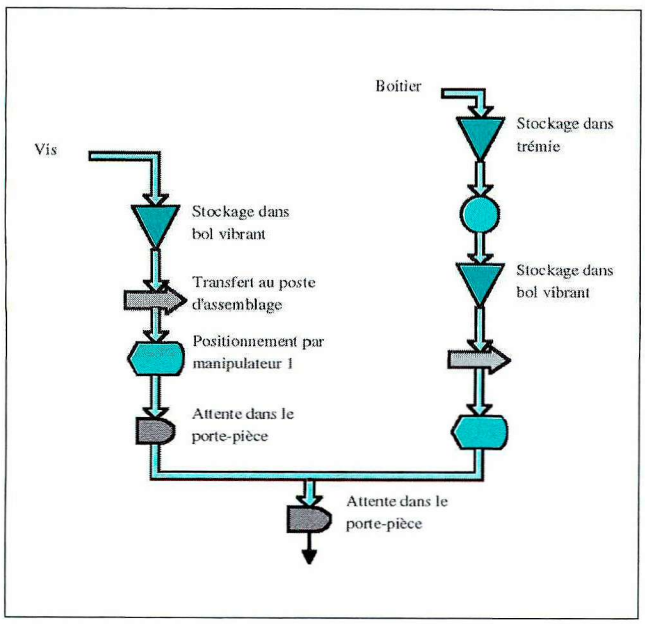
Objectif de description : représentation précise des temps de déplacement, de transfert, de réglage ... uniquement dans l'industrie automobile.

Semblable au diagramme de Gantt, cet outil a été développé pour des besoins spécifiques à un corps de métier.

Limite de l'outil : assez lourd à employer ; diffusion restreinte en dehors de son contexte.

Position par rapport au Grafcet : en amont du Grafcet dans la phase de spécification, peut aider à son écriture.

1.3.5.5. Process Charts [ANS.79]



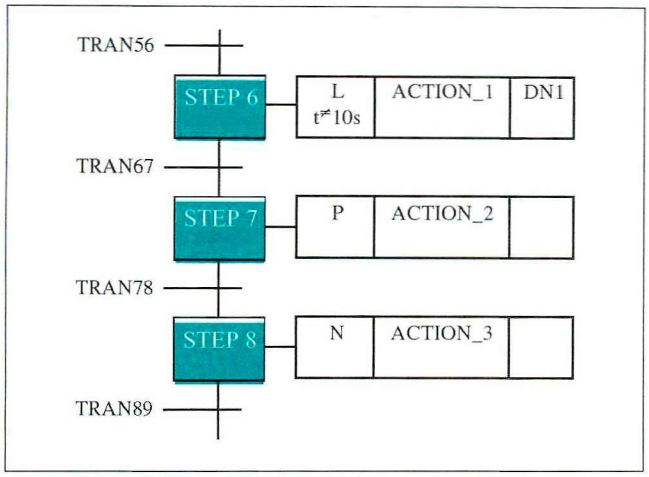
Objectif de description : modélisation des flux de produits en représentant les étapes de transformation, d'assemblage et de transfert de ces produits.

Limite de l'outil : outil américain issu du génie industriel et de diffusion limitée en Europe.

Position par rapport au Grafcet : en simulant le comportement de la partie opérative, utilisé en amont du Grafcet, il permet d'avoir une vision produit – procédé.

1.3.6. Les outils d'implantation d'une partie commande programmée

1.3.6.1. Le diagramme fonctionnel en séquence (SFC : Sequential Function Chart) [NFE.93]



Objectif de description : programmation des automates programmables industriels avec une primitive graphique de structuration, issue du Grafcet.

Limite de l'outil : les A.P.I. intègrent de plus en plus cette primitive de structuration, mais le S.F.C. n'est pas du Grafcet !

Position par rapport au Grafcet : reprend la plupart des concepts et primitives du Grafcet, en incluant des dispositions particulières spécifiques à la programmation des A.P.I. Cette solution est à privilégier pour l'implantation à partir d'une spécification grafcet, car elle permet de conserver la structuration graphique.

1.3.6.2. Le langage liste d'instructions (IL : Instruction List) [NFE.93]

```
        LD      R1
        JMPC    RESET
        LD      POP
        ANDN    EMPTY
        JMPC    POP_STK
        LD      PUSH
        ANDN    OFLO
        JMPC    PUSH_STK
        RET
RESET   LD      0
        ST      OFLO
        LD      1
        ST      EMPTY
```

Objectif de description : programmation des automates programmables industriels avec un langage littéral, proche d'un langage machine (type assembleur).

Limite de l'outil : mauvaise lisibilité, ne montre pas le parallélisme.

Position par rapport au S.F.C. : une des composantes du S.F.C. pour l'écriture des conditions de transition.

Ce langage constitue souvent la traduction cachée du Grafcet dans ses implantations programmées.

1.3.6.3. Le langage littéral structuré (ST : Structured Text) [NFE.93]

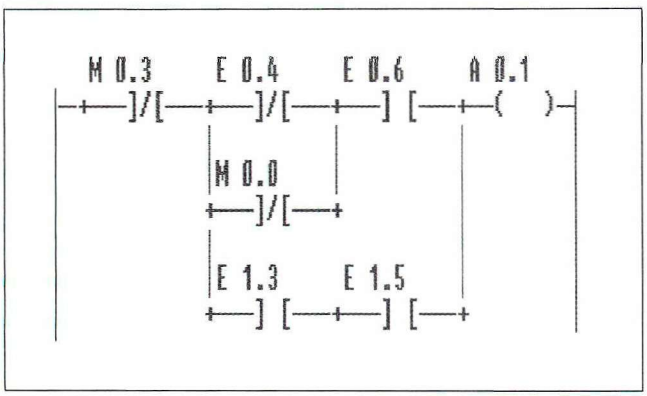
```
VAR XI : REAL ;
        T : TIME := T≠0s ;
END_VAR
BUSY := RUN ;
IF RUN THEN
        IF T >= TR THEN BUSY := 0 ; XOUT := X1 ;
        ELSE XOUT := XI + (X1-XI) * TIME_TO_REA
                T := T + CYCLE ;
        END_IF
ELSE XOUT := X0 ; XI := X0 ; T := T≠0s ;
```

Objectif de description : programmation des automates programmables industriels avec un langage littéral, proche d'un langage évolué (type C, Pascal, ...).

Limite de l'outil : mauvaise lisibilité, ne montre pas le parallélisme.

Position par rapport au S.F.C. : permet aussi l'écriture des conditions de transition dans le S.F.C. ; sert également à décrire le comportement des F.B.D.

1.3.6.4. Le langage à contact (LD : Ladder Diagram) [NFE.93]

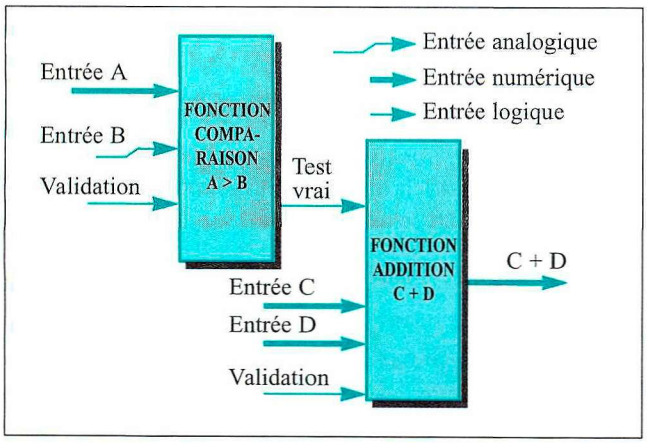


Objectif de description : programmation des automates programmables industriels avec un langage graphique de type câblé ; pour des raisons historiques liées à la formation des opérateurs, c'est l'outil de base des réalisations industrielles à condition que le support logiciel de l'application le permette.

Limite de l'outil : ne permet pas d'avoir une vue globale du fonctionnement du système.

Position par rapport au S.F.C. : permet aussi l'écriture des conditions de transition dans le S.F.C. De plus, il est parfois utilisé en traduction du Grafcet.

1.3.6.5. Le langage blocs fonctionnels (FBD : Function Block Diagram) [NFE.93]



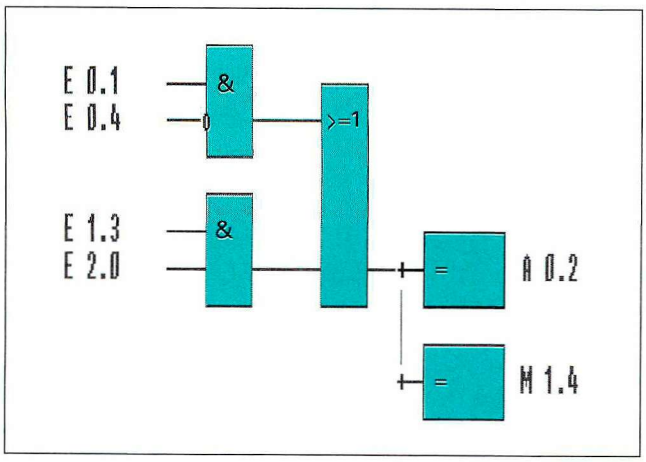
Objectif de description : programmation des automates programmables industriels avec un langage graphique sous forme de boîtes fonctionnelles génériques.

Limite de l'outil : caractère fonctionnel uniquement ; comportement statique, ne met pas en évidence la séquence d'apparition des données d'entrées.

Position par rapport au S.F.C. : un bon complément lorsqu'il s'agit de traiter des fonctions standards ne faisant pas l'objet d'une séquence.

1.3.7. Les outils d'implantation d'une partie commande câblée

1.3.7.1. Le logigramme [ISO.88] [ISO.90]

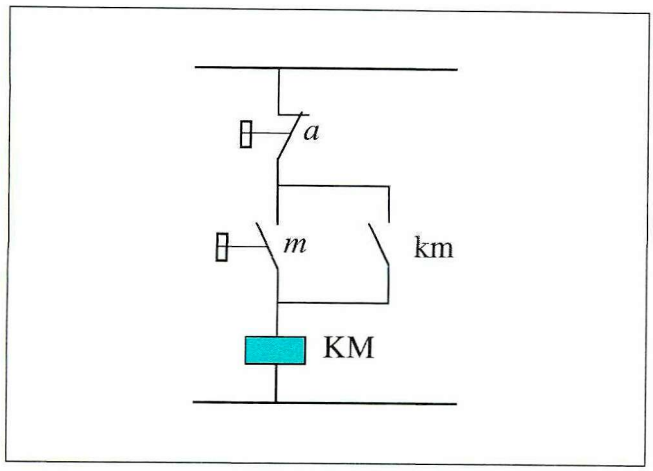


Objectif de description : représentation de logiques câblées pneumatiques ou électroniques, lorsque l'application fait appel à des fonctions standards, en vue d'en faire la réalisation.

Limite de l'outil : facilement transposable en technologie électronique et pneumatique, elle ne l'est pas en technologie électromécanique (systèmes à relais).

Position par rapport au Grafcet : peut en être l'une de ses traductions câblées.

1.3.7.2. La schématique électrique



Objectif de description : description d'un système câblé (de commande ou de puissance) en vue de sa réalisation, de sa documentation et de sa maintenance.

Il existe également d'autres schématiques (pneumatiques, hydrauliques).

Limite de l'outil : liée essentiellement à la technologie.

Position par rapport au Grafcet : peut en être une représentation matérielle ou son complément pour les parties câblées de l'application.

1.4. Critères de choix d'un modèle

Dans bien des cas, plusieurs modèles répondront à la problématique envisagée. Le choix du concepteur sera cependant guidé par des facteurs objectifs (ou non !) et le modèle choisi sera :

- celui que le concepteur maîtrise le mieux ;
- celui que la culture d'entreprise impose (maintenance, politique d'achat, ...) ;
- celui que le matériel cible acceptera (dans le cas où l'objectif de la description est l'implantation).

Il faut cependant prendre garde à ne pas employer un modèle contre nature.

Ainsi pour ce qui concerne le Grafcet, un mauvais choix serait par exemple de l'employer pour la représentation d'un comptage important. On préférera pour ce cas, l'emploi d'un schéma bloc fonctionnel (voir chapitre 4 : Eléments de construction d'un grafcet), voire d'un réseau de Petri ; une autre erreur serait de l'utiliser dans les cas où le système à modéliser comporterait des flux ou des stockages numériques importants.

Si on utilise le Grafcet pour une application qui possède de nombreuses séquences parallèles et où la sécurité impose une vérification des éventuels conflits entre les actions, l'explosion combinatoire des situations accessibles peut vite devenir difficilement gérable par le concepteur (voir chapitre 5 : Grafcet et graphe d'état).

Enfin, le concepteur prendra garde de ne pas rendre séquentiel, par l'emploi du Grafcet, un problème qui ne le serait pas au départ !

1.5. Conclusion

Nous avons donné des critères à respecter pour un modèle de commande de système automatisé de production et nous avons montré que le Grafcet répond particulièrement bien aux spécifications à satisfaire et qu'il n'a rien à envier à ses concurrents. Mais le Grafcet n'est pas l'outil unique d'une modélisation de commande et d'autres outils peuvent lui être associés et permettent d'obtenir une modélisation plus complète. A cet effet, nous verrons au chapitre 4 et dans les deux applications du chapitre 7, l'utilisation conjointe et complémentaire du Grafcet avec d'autres outils de modélisation.

La suite de cet ouvrage se consacre essentiellement au Grafcet, ses étapes de normalisation, ses problèmes de conception au travers de ses frontières, ses modes de construction et sa validation, pour terminer sur ses possibilités d'implantation.

1.6. Pour en savoir plus ...

1.6.1. Références bibliographiques

[ADE.81] « Le GEMMA : guide d'étude des modes de marche et d'arrêt », Brochure ADEPA (Agence pour le Développement de la Productique Appliquée à l'industrie), Edition n°2, 1981, 32 pages ;

[ALA.88] « Les automatismes et leur CAO », P. ALANCHE, Editions HERMES – Collection Technologies de Pointe n° 12, 1988, 62 pages ;

[ANS.79] « Process Charts », American National Standard ANSI Y 15.3, 1979, 15 pages ;

[BER.93] « Théorie générale des systèmes », L. VON BERTALANFFY, Editions DUNOD, PARIS, 1993 ;

[BRI.90] « Des outils pour la gestion de production industrielle », J.-L. BRISSARD, M. POLIZZI, AFNOR Gestion, 1990, pages 151 à 160 ;

[BUN.77] « Epistémologie », M. BUNGE, MALOINE, PARIS, 1983 ;

[CEI.88] « Etablissement des diagrammes fonctionnels pour systèmes de commande / Preparation of function charts for control systems », Norme Internationale / International Standard, CEI/IEC 848, 1988, 99 pages ;

[CER.88] « La simulation des systèmes de production », A. CERNAULT, CEPADUES Editions, Collection Automatisation et Production, 1988, 392 pages ;

[COL.97] « Sciences industrielles 1 », G. COLOMBARI, J. GIRAUD, Editions FOUCHER, 1997, 320 pages ;

[DAV.92] « Du Grafcet aux Réseaux de Petri », R. DAVID, H. ALLA, Editions HERMES, PARIS, 1992, 500 pages ;

[DUR.96] « La systémique », D. DURAND, P.U.F. – Collection Que sais-je ? – 7ème édition, PARIS, 1996 ;

[HAR.87] « Statecharts : a visual formalism for complex systems », HAREL, Journal of science of computer programming, Vol. 8, n°1, pages 231 à 274 ;

[HEN.97] « Concepts et outils pour les systèmes de production », J.C. HENNET, CEPADUES Editions, 1997, 328 pages ;

[IGL.89] « SADT, un langage pour communiquer », IGL TECHNOLOGY, Editions EYROLLES, 1989, 336 pages ;

[ISO.88] « Transmissions hydrauliques et pneumatiques logiques par les fluides – Partie 1 : symboles pour fonctions logiques binaires et connexes », norme NF ISO 5784-1, décembre 1988 ;

[ISO.90] « Transmissions hydrauliques et pneumatiques logiques par les fluides – Partie 2 : symboles pour alimentations et échappements et règles d'emploi des symboles pour les fonctions logiques », norme NF ISO 5784-2, septembre 1990 ;

[LEM.90] « La théorie du système général : théorie de la modélisation », J.L. LE MOIGNE, P.U.F. – 3e édition, PARIS, 1990 ;

[MER.95] « Automatique et informatique industrielle », C. MERLAUD, J. PERRIN, J.P. TRICHARD, Editions DUNOD, 2e édition, 1995, 256 pages ;

[MSR.96] Actes du congrès MSR'96 : « Modélisation des systèmes réactifs », AFCET, BREST, 28 et 29 mars 1996 ;

[NFE.93] « Automates programmables – Partie 3 : Langages de programmation », Norme Française et Norme Européenne NF EN 61131-3, CENELEC ; Version française de la norme CEI/IEC 1131-3, 202 pages ;

[NFZ.75] « Symboles et conventions pour les organigrammes des données et les organigrammes de programmation », norme NF Z 67-010, août 1975 ;

[ROS.77] « Le macroscope : vers une vision globale », J. DE ROSNAY, Editions LE SEUIL, PARIS, 1977 ;

[T&F.93] « 30 ans d'automatisation chez Renault », Revue Technologie et Formation N°51, 1993 ;

[WAL.77] « Systèmes et modèles », B. WALISER, Editions LE SEUIL, PARIS, 1977 ;

[WAR.85] « Structured development for real time systems », P. WARD, J. MELLOR, Prentice Hall, 1985.

1.6.2. Références bibliographiques sur l'historique de l'automatique

« Les automates », J. BEDEL, Editions GRANCHER,

« Les mécaniciens grecs », D. GILLE, Editions LE SEUIL,

« Le temps des robots », P. MARSH, Editions BORDAS,

et plusieurs articles de *l'ENCYCLOPEDIA UNIVERSALIS.*

1.6.3. Quelques sites à visiter sur Internet ...

Les moteurs de recherche donnent très facilement les adresses « web » qui contiennent des informations en matière de modèles.

De nombreux sites étrangers traitent de SADT, de SA-RT, des Réseaux de Petri (très populaires en Europe du nord) mais aussi des tableaux de Karnaugh ou « K-maps » (tableaux en 3D, optimisation combinatoire ...).

Dans bien des cas cependant la valeur de l'information n'est pas en rapport avec l'attente du « surfeur ».

Voici quelques sites parmi les mieux documentés dans le domaine qui nous intéresse.

Les sites français ...

www.cran.u-nancy.fr – le centre de recherche en automatique de Nancy propose un vaste choix d'articles et de logiciels dans le domaine de l'automatique.

www.laas.fr – (CNRS -Toulouse) – recherche et application des Réseaux de Petri dans les industries manufacturières et les industries de process.

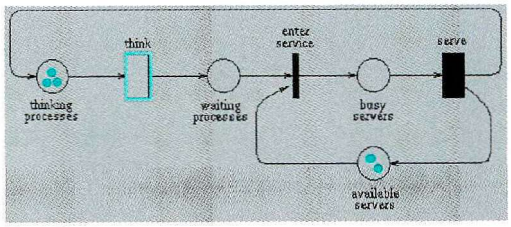
www.ec-lille.fr/~rdp/ – le nouveau site du groupe de recherche français sur les Réseaux de Petri.

www.lurpa.ens-cachan.fr/grafcet/ – **le site du groupe Grafcet;** dernières nouvelles, publications, rendez-vous, séminaires et conférences, bibliographie, tout le Grafcet et rien que du Grafcet! mais aussi, des articles (en français!) sur l'ensemble du Génie Automatique.

... et aussi quelques sites internationaux :

http://castle.ee.nctu.edu.tw/others/ld96b/chap5/index.htm/ – à Taïwan, des tableaux de Karnaugh de toutes sortes.

www.daimi.aau.dk/PetriNets/ – « la maison des réseaux de Petri » au Danemark, propose des liens avec le monde entier; documentation très fournie.



A la maison des RdP, un jeu vous est proposé en guise de formation inter-active!

www.di.ufpe.br/~lrl/statecharts/ – « statecharts on the web » un site brésilien très complet où l'on trouve l'essentiel des travaux sur les statecharts depuis 1985.

1.6.4. Les logiciels

Il existe de nombreux logiciels de conception de grafcet ou de programmation d'A.P.I. dépendant des constructeurs, dont on ne parlera pas ici.

Cependant, concernant l'aspect pédagogique on citera :

- « GRAF7-C », B. DIMA, M. MANKA, développé au Québec, ce logiciel permet, outre un éditeur-simulateur de Grafcet, de structurer une application écrite en langage C. Une carte d'entrées/sorties adaptée permet la commande directe d'une P.O.
- « Parcours Interactif pour Découvrir le Grafcet », R. LE GOFF, logiciel développé sous environnement MAC' INTOSH et diffusé par le CRDP de Basse-Normandie.

CHAPITRE 2

GRAFCET ET NORMALISATION

CHAPITRE 2
GRAFCET ET NORMALISATION

Le nombre important d'ouvrages (souvent contradictoires) sur le Grafcet et l'existence de plusieurs documents à caractère normatif créent une certaine confusion et entraînent des interprétations divergentes. Ce chapitre fait le point sur les différentes étapes de la normalisation du Grafcet puis il propose une unification de la syntaxe et de son interprétation à partir du contenu de la norme CEI 60 848.

2.1. Les étapes de la normalisation du Grafcet

2.1.1. Les organismes de normalisation

De nombreux pays se sont dotés d'organismes de normalisation nationaux ; afin de favoriser les échanges internationaux, les normes nationales sont harmonisées au niveau européen par le Comité Européen de Normalisation (C.E.N.) et au niveau mondial par l'International Organization for Standardization (ISO) qui remplaça l'ISA en 1947.

Chaque organisme centralisateur est organisé autour de comités techniques tel le CEI au niveau international, le CENELEC au niveau européen et l'UTE au niveau français. L'organigramme général est structuré comme indiqué figure 2-1.

Chaque norme éditée par un comité technique international peut être reprise (ou non) par l'ISO, mais doit faire l'objet d'une publication par le comité technique européen correspondant. Toute norme nationale est rendue caduque dans son pays d'origine par l'apparition d'une norme internationale (sauf prescriptions additionnelles).

Le statut de l'Association Française de NORmalisation (AFNOR), créée le 22 Juin 1926, est fixé par un décret du 24 Mai 1941 puis confirmé par une ordonnance du 9 Août 1944.

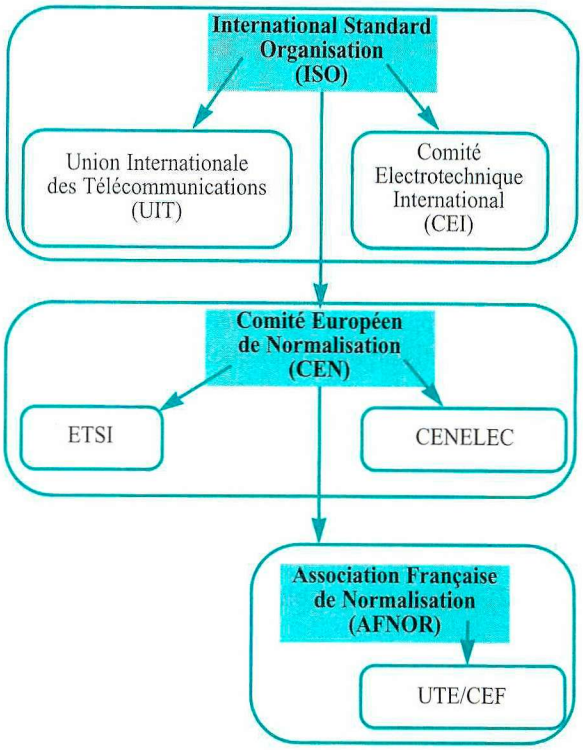
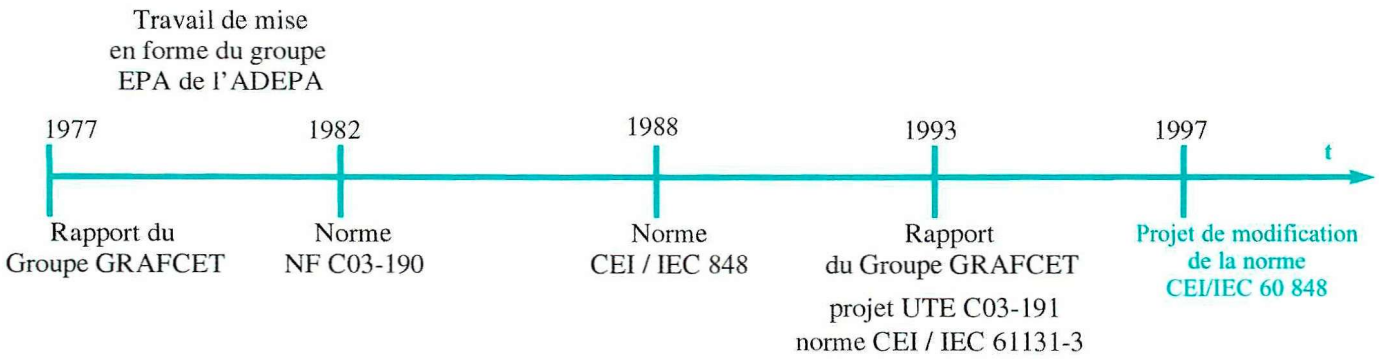


Figure 2-1 : organigramme général de la normalisation

2.1.2. La chronologie

En 1975, une « commission de normalisation de la représentation du cahier des charges d'un automatisme logique » (animée par Michel Blanchard) [BLA.79] est créée au sein de l'AFCET[1] ; après deux ans de travail, le rapport de la commission (présenté en Décembre 1977 à Montpellier) définit le Grafcet. Le groupe EPA (Equipements de Production Automatisée) de l'ADEPA[2] reprend les travaux de la commission de normalisation, son travail de mise en forme permet la parution de la norme NF C03-190 en 1982 [NFC.82].

1. Cette « Association Française des sciences et technologie de l'information et des systèmes » a été dissoute en 1997.
2. Agence pour le Développement de la Productique Appliquée à l'industrie.



En 1988, le Grafcet est l'objet d'une norme internationale : CEI/IEC 848 [IEC.88] (reprise dans le document UTE C03-190). L'année 1993 voit la publication de deux documents importants mais souvent mal utilisés :

- le ***projet*** de norme UTE C03-191 [UTE.93] rédigé à partir des travaux du groupe « GRAFCET » de l'AFCET,
- la norme CEI/IEC 1131 [NFE.93] concernant les automates programmables industriels, et en particulier la partie 3 **définissant les langages de programmation**.

En 1998, la norme CEI/IEC 60848 est en cours de révision, un premier rapport (3B/215/CD) est en discussion.

2.1.3. La norme NF C03-190

2.1.3.1. Domaine d'application

Cette norme s'applique à ***tout système logique de commande*** d'automatisme industriel quelle qu'en soit sa complexité ou la technologie de réalisation.

Le diagramme fonctionnel Grafcet décrit tout système dont les évolutions peuvent s'exprimer séquentiellement, c'est-à-dire dont la décomposition en étapes est possible.

2.1.3.2. Structure d'un système automatisé

Après avoir défini son domaine d'application, la norme NF C03-190 définit la structure d'un système automatisé (figure 2-2) comme l'ensemble de deux parties interdépendantes :

- la partie opérative (PO), processus physique à automatiser,
- la partie commande (PC), automatisme qui, en fonction d'informations externes, élabore les ordres destinés à la partie opérative ou à des éléments extérieurs.

La description du comportement de la partie commande peut être faite à trois niveaux :

- les spécifications *fonctionnelles* qui caractérisent les comportements de la partie commande face aux informations qu'elle reçoit,
- les spécifications *opérationnelles* qui caractérisent la sûreté de fonctionnement et les modes de marche,
- les spécifications *technologiques* qui tiennent compte des solutions matérielles et/ou logicielles utilisées.

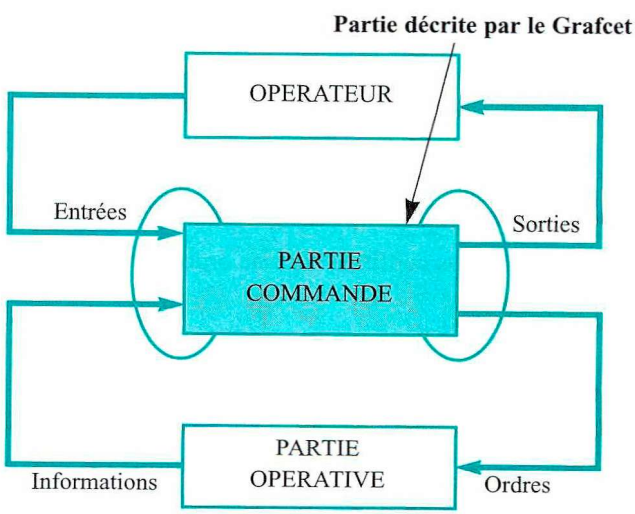


Figure 2-2 : structure d'un S. A. P. selon NF C03-190

La norme NF C03-190 ne concerne théoriquement que l'aspect fonctionnel des représentations du comportement de la partie commande, son domaine d'application est donc très restreint. Ceci est en contradiction avec la définition des actions associées aux étapes (figure 2-3).

Elles indiquent ce qui doit être fait, par la partie opérative, par des éléments extérieurs ou par la partie commande lors de l'activité de l'étape.

Cette faiblesse dans la définition des frontières d'un système est sans doute à l'origine des erreurs fréquentes que l'on peut rencontrer dans la définition et l'utilisation des points de vue. Le chapitre 3 donnera au lecteur un nouvel éclairage sur ce problème.

Figure 2-3 : exemple d'actions associées à une étape

Malgré quelques imperfections, la norme NF C03-190 a permis de généraliser l'utilisation du Grafcet en France en définissant notamment :

- un graphisme aujourd'hui admis par tous (et repris en partie par la norme CEI/IEC 60848),
- cinq règles d'évolution (toujours en vigueur) :

- Règle 1 : la situation initiale du grafcet caractérise le comportement initial de la partie commande vis-à-vis de la partie opérative et correspond aux étapes actives au début du fonctionnement.
- Règle 2 : l'évolution de la situation du grafcet correspondant au franchissement d'une transition ne peut se produire que lorsque cette transition est validée et que la réceptivité associée à cette transition est vraie. Lorsque ces deux conditions sont réunies, la transition devient franchissable et est alors franchie.
- Règle 3 : le franchissement d'une transition entraîne simultanément l'activation de toutes les étapes immédiatement suivantes et la désactivation de toutes les étapes immédiatement précédentes.
- Règle 4 : plusieurs transitions simultanément franchissables sont simultanément franchies.
- Règle 5 : si au cours du fonctionnement de l'automatisme, une même étape doit être désactivée et activée simultanément, elle reste active.

2.1.4. La norme CEI 60848

Décembre 1988, 11 ans après sa création, le Grafcet fait l'objet d'une norme internationale éditée par la Commission Électrotechnique Internationale : la CEI/IEC 60848 qui définit « l'établissement des diagrammes fonctionnels pour systèmes de commande ».

La norme CEI 60848 annule et remplace la norme NF C03-190, elle s'applique à la description du fonctionnement des systèmes de commande définis par la norme CEI 50 [CEI.75].

Un *système de commande* est un système qui établit une loi de causalité entre une entrée et une sortie ; « l'entrée commande la sortie ».

Cette définition, surtout utilisée dans le domaine des systèmes continus, peut s'appliquer à tout système automatisé de production (figure 2-4) ; elle présente un avantage considérable sur le contenu de la norme NF C03-190. La frontière et les entrées/sorties de chaque système ou sous-système sont déterminées de manière précise ; notamment, les entrées du système commandé (P.O.) sont les ordres venant de l'équipement de commande (P.C.), les sorties étant les actions exécutées par le processus afin d'effectuer les effets désirés ou de renvoyer les informations vers l'équipement de commande.

- La norme CEI/IEC 60848 conserve le graphisme et les règles d'évolutions définis par la C03-190, sans autoriser de manière explicite le parallélisme interprété.
- Elle définit une représentation détaillée des ordres associés aux étapes.
- Elle redéfinit les conditions de transition (ou réceptivités) et supprime la notion de « temporisation » définie par la C03-190.
- Elle autorise la réutilisation d'une séquence, notion proche du concept de tâche qui n'est pas normalisé [GRE.85].
- Elle autorise la « représentation détaillée » d'une étape en lieu et place de la macro-étape qui, bien que souvent utilisée, n'a jamais été normalisée.

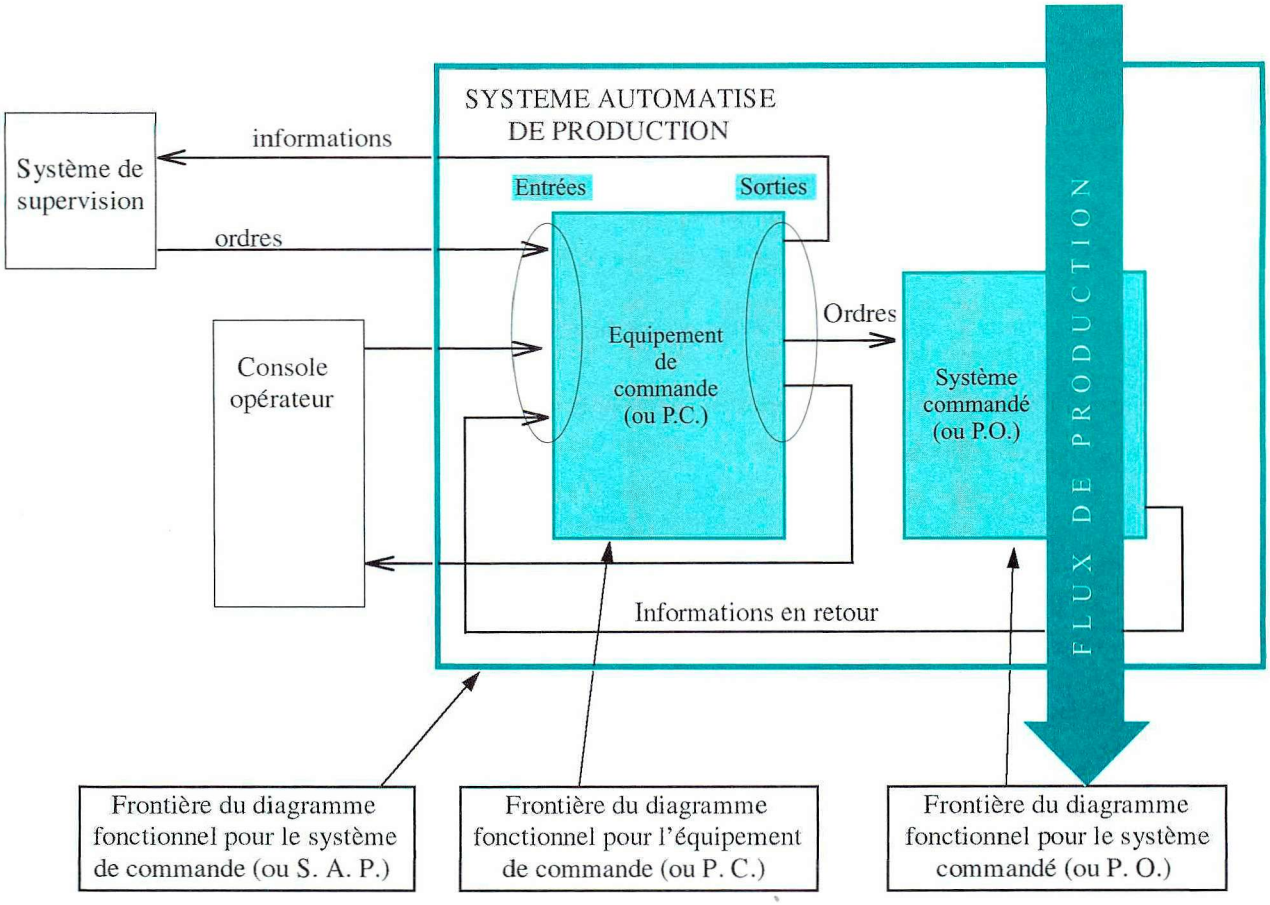


Figure 2-4 : structure d'un système automatisé (système de commande selon CEI 848)

Le lecteur trouvera un schéma plus détaillé du S. A. P. en figure 3-5.

2.1.5. La norme CEI 1131-3

Elle définit (entre autres) les éléments du diagramme fonctionnel en séquence (SFC) pouvant être utilisés dans l'organisation d'un programme automate écrit en langage graphique. Elle utilise les définitions de la CEI 848 avec les modifications nécessaires à la réalisation d'éléments de commande d'exécution.

La norme CEI 1131-3 est une norme concernant les langages de programmation d'automates ; en autorisant l'utilisation du diagramme fonctionnel en séquence (langage de programmation inspiré du Grafcet), elle permet de donner aux programmes une structure proche de la spécification Grafcet. Elle favorise donc un diagnostic rapide des défaillances et une meilleure maîtrise du système par l'équipe chargée de la conduite.

La norme CEI 1131 s'applique aux automates programmables, de ce fait elle ne remet pas en cause et n'annule pas la norme CEI 848 qui reste, pour l'instant, le seul élément de référence officiel concernant le Grafcet.

2.2. Les éléments normalisés (CEI/IEC 848)

Ce paragraphe ne présente que les éléments essentiels de la norme CEI 848, le lecteur se reportera utilement au document original disponible à l'UTE.

Un grafcet est constitué par une alternance d'étapes et de transitions reliées par des liaisons orientées, ceci définit l'aspect syntaxique du modèle. Le graphe étant interprété, il est possible d'associer une ou plusieurs actions à chaque étape ; à chaque transition est associée une condition de transition (ou réceptivité).

2.2.1. Les éléments graphiques

2.2.1.1. Les étapes

Une étape (et les ordres qui lui sont associés) caractérise un comportement invariant du système, elle est identifiée par un carré et un repère alphanumérique :

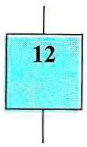


Figure 2-5 : étape

Une étape est soit active, soit inactive ; l'ensemble des étapes actives définit la situation du grafcet et, par suite, celle du système spécifié. Les étapes qui sont actives au début du processus de commande (à l'instant initial) correspondent à la situation initiale, ce sont les étapes initiales :

Figure 2-6 : étape initiale

Une étape active peut :

- émettre un ou plusieurs ordres si le grafcet spécifie le comportement d'une partie commande (ou équipement de commande),
- produire une ou plusieurs actions si le grafcet spécifie le comportement d'un système automatisé de production (système de commande) ou d'une partie opérative (système commandé).

L'ordre ou l'action sont représentés par une forme littérale ou symbolique suffisamment explicite pour éviter toute confusion :

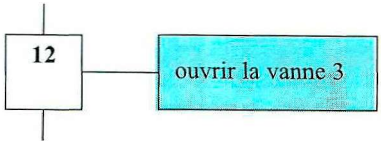


Figure 2-7 : action associée

Une étape ne comportant pas d'ordre (ou action) associé correspond généralement à un comportement d'attente d'événements non commandés qui peuvent être annotés sous forme de commentaires :

Figure 2-8 : commentaire associé à une étape

Les ordres détaillés permettent de tenir compte de la réalisation et des particularités demandées par le spécificateur (conditions, mémorisations, ...) ; afin d'effectuer une distinction entre ces diverses indications, le symbole général d'un ordre peut être divisé en trois parties.

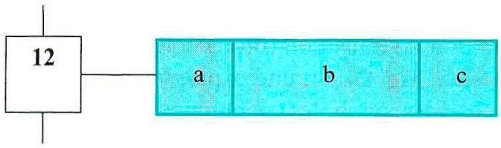


Figure 2-9 : représentation détaillée d'une action

- La partie « a » contient une lettre symbole ou une combinaison de lettres décrivant le traitement appliqué au signal binaire de l'étape.
- La partie « b » contient une déclaration symbolique ou littérale décrivant l'ordre (ou l'action), elle est au moins deux fois plus grande que les sections « a » et « c ».
- La partie « c » indique le numéro de référence du signal de fin d'exécution correspondant.

Les parties « a » et « c » ne sont spécifiées que si nécessaire.

Si plusieurs ordres ou actions sont associés à une même étape, il est possible de disposer ces derniers de plusieurs façons. Les dispositions 2, 3 et 4 permettent d'éviter toute confusion dans l'interprétation de la lettre symbole de la zone {a }.

Figure 2-10 : disposition n° 1

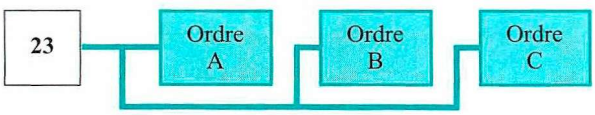


Figure 2-11 : disposition n° 2

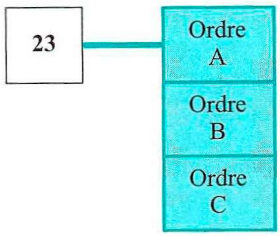


Figure 2-12 : disposition n° 3

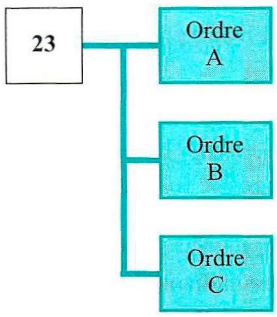


Figure 2-13 : disposition n° 4

2.2.1.2. Les transitions

La transition permet de décrire la possibilité d'évolution de l'état actif d'une étape à une autre ; la transition est identifiée (voir figure 2-14) par un tiret situé entre les étapes concernées par l'évolution :

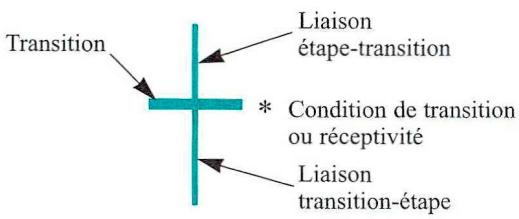


Figure 2-14 : Description d'une transition

La condition de transition (ou réceptivité) peut être décrite par un texte (fig. 2-15), une expression booléenne (fig. 2-16), ou par des symboles graphiques normalisés (fig. 2-17 et 2-18).

Les changements d'état des variables (front montant et front descendant) sont admis au même titre que l'état des variables. La norme ne précise pas la façon dont il faut prendre en compte les changements d'états.

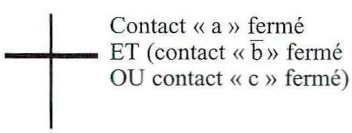


Figure 2-15 : description littérale d'une réceptivité

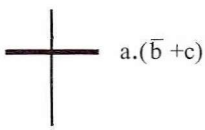


Figure 2-16 : description booléenne d'une réceptivité

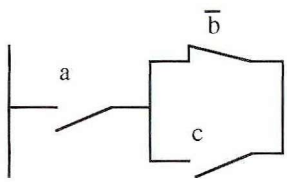


Figure 2-17 : description d'une réceptivité par schéma électrique

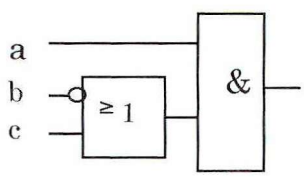


Figure 2-18 : description d'une réceptivité par logigramme

La temporisation définie par la norme C03-190 disparaît au profit d'un « opérateur binaire à retard ».
Le chronogramme de l'opérateur à retard est donné figure 2-19 ; tout signal binaire peut être utilisé comme entrée de l'opérateur à retard.

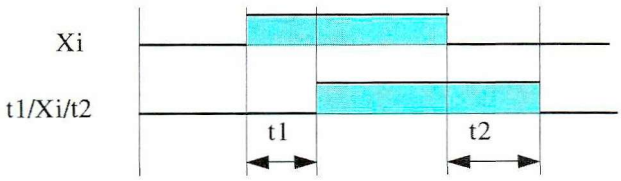


Figure 2-19 : chronogramme de l'opérateur à retard

La réceptivité devient vraie après un retard t1 référé au front montant de X25 et redevient fausse après un retard t2 référé au front descendant de X25 (figure 2-20).

Si t1 (ou t2) est égal à zéro, la notation X25/t2 (ou t1/X25) sera préférée.

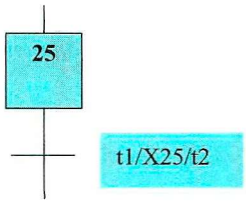


Figure 2-20 : réceptivité dépendante du temps d'activité de l'étape 25

2.2.1.3. Sélection de séquence

La sélection entre plusieurs séquences (ou divergence en « OU ») est représentée par autant de symboles de transition, sous une ligne horizontale, qu'il y a de choix possibles ; aucun symbole de transition n'est autorisé au dessus de la ligne horizontale.

L'utilisation de transitions exclusives permet de sélectionner une seule séquence.

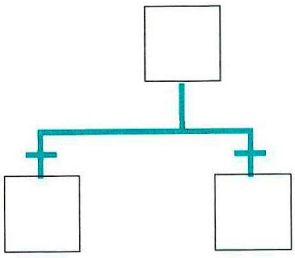


Figure 2-21 : sélection de séquence

La fin de sélection de séquence (ou convergence en « OU ») est représentée par autant de symboles de transition, au dessus d'une ligne horizontale, qu'il y a de séquences à regrouper ; aucun symbole de transition n'est autorisé au dessous de la ligne horizontale.

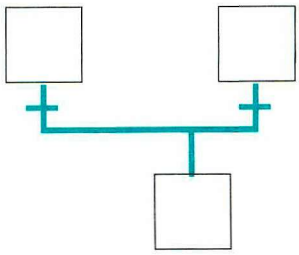


Figure 2-22 : fin de sélection de séquence

La sélection de séquence et la fin de sélection peuvent être associées dans la notion d'étape généralisée définie au chapitre 4 (figure 4-5a).

2.2.1.4. Séquences simultanées

Lorsqu'un événement active plusieurs séquences au même instant, ces séquences sont dites simultanées. Un symbole unique de transition au dessus d'une ligne double horizontale permet de représenter le début de séquences simultanées (ou divergence en « ET »).

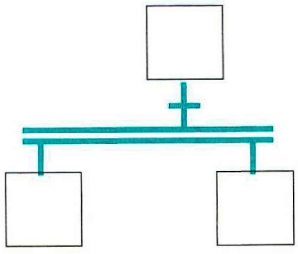


Figure 2-23 : début de séquences simultanées

Lorsque plusieurs séquences simultanées convergent (convergence en « ET »), la synchronisation est représentée par un symbole unique de transition au dessous d'une ligne double horizontale.

Le début et la fin de séquences simultanées peuvent être associés dans la notion de transition généralisée définie au chapitre 4 (figure 4-5b).

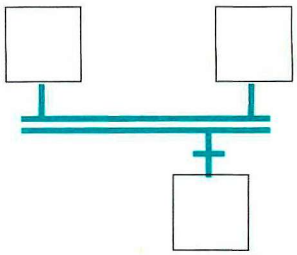


Figure 2-24 : fin de séquences simultanées

2.2.1.5. Les liaisons orientées

Par convention, le sens d'évolution est du haut vers le bas ; les liaisons orientées sont horizontales ou verticales, mais les liaisons obliques sont admises lorsqu'elles apportent plus de clarté (figure 4-24). Les flèches indiquant le sens d'évolution sont utilisées lorsque cela est nécessaire pour lever une ambiguïté.

Le croisement des liaisons est permis, aussi, lorsque la confusion est possible (figure 2-25a), les sélections de séquences seront représentées comme figure 2-25b ou 2-25c :

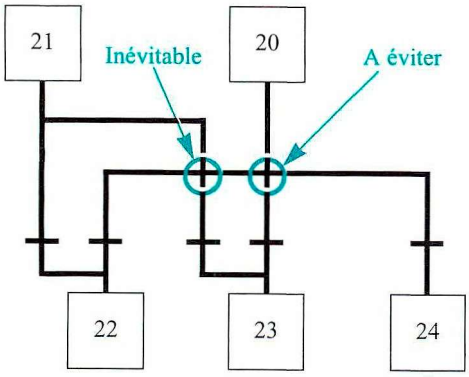


Figure 2-25a : confusion dans une sélection de séquence

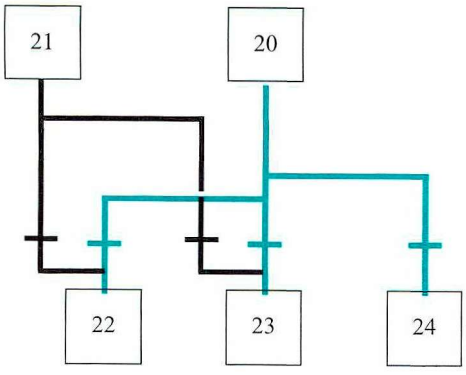


Figure 2-25b : solution n° 1

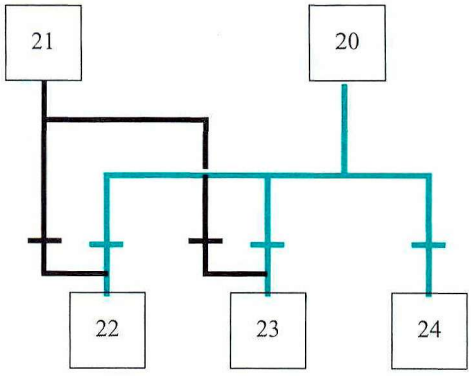


Figure 2-25c : solution n° 2

Lorsqu'une liaison doit être interrompue (construction complexe ou changement de page), le renvoi de départ est constitué par le numéro d'étape et le numéro de la page (si cela est nécessaire) d'arrivée. Le renvoi d'arrivée est constitué par le numéro de l'étape et le numéro de la page de départ.

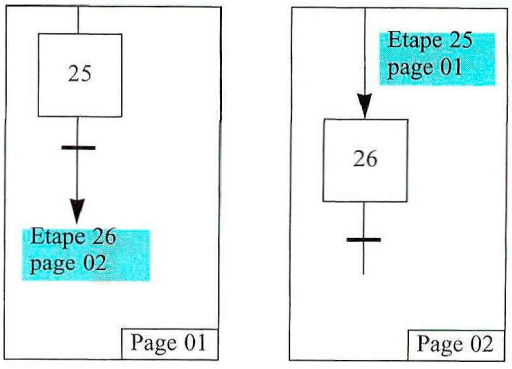


Figure 2-26 : utilisation d'un renvoi

Il est recommandé de ne pas construire de grafcet occupant plusieurs pages car, dans ces conditions, la lisibilité (qualité importante du modèle) est sensiblement réduite. On préférera alors utiliser une primitive de structuration telle que la macro-étape (voir paragraphe 2.3.3.).

2.2.2. Le comportement dynamique

La norme CEI 848 a repris les cinq règles d'évolution définies par la norme NF C03-190 en y ajoutant une description plus détaillée des actions associées aux étapes :

- L'ordre « simple » est émis dès que et tant que l'étape est active pour un ordre non mémorisé figure 2-27.

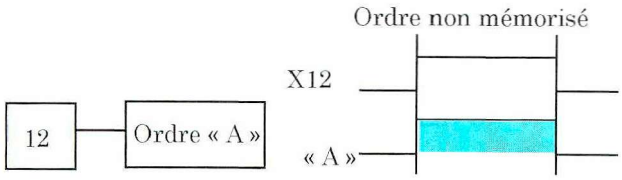


Figure 2-27 : ordre non mémorisé

- L'émission de l'ordre peut être retardée par rapport à l'activité de l'étape (figure 2-28); l'ordre n'est plus émis dès que l'étape est désactivée. Si l'étape reste active moins de D unités de temps, l'ordre n'est pas émis.

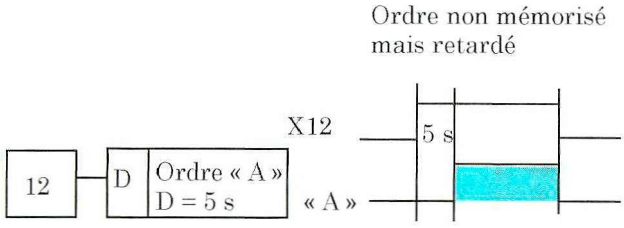


Figure 2-28 : ordre retardé (D, delayed)

- L'ordre peut être limité dans le temps (figure 2-29). L'ordre est émis dès que l'étape est active, mais sa durée est limitée à L unités de temps. Si la durée est très courte, la lettre L peut être remplacée par la lettre P (impulsion).

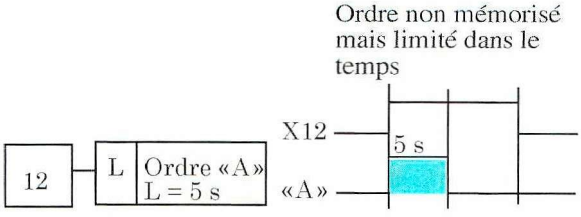


Figure 2-29 : ordre limité dans le temps (L : time limited)

- L'ordre peut être conditionnel (figure 2-30). L'ordre n'est émis que si l'étape est active ***et*** si la condition est vraie.

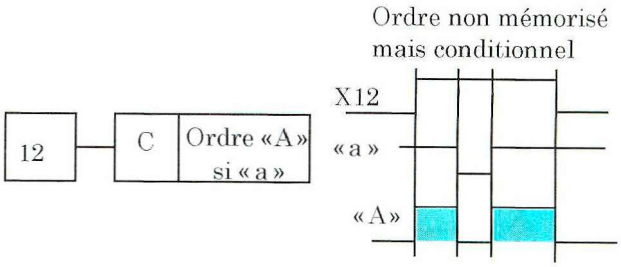


Figure 2-30 : ordre conditionnel (C : conditional)

Les ordres retardés ou limités dans le temps peuvent être remplacés par des ordres conditionnés par l'opérateur à retard :

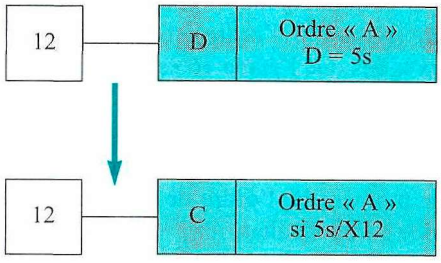


Figure 2-31 : ordres retardés (D : delayed)

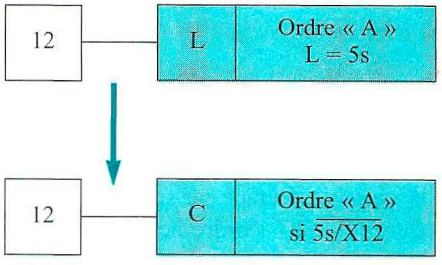


Figure 2-32 : ordres limités dans le temps (L : time limited)

Les ordres mémorisés sont désignés par la lettre S (stored) avec indication de début et de fin (figure 2-33). Cette représentation se distingue de la solution préconisée par la norme CEI 1131-3 qui utilise les lettres S (mise à 1) et R (mise à 0).

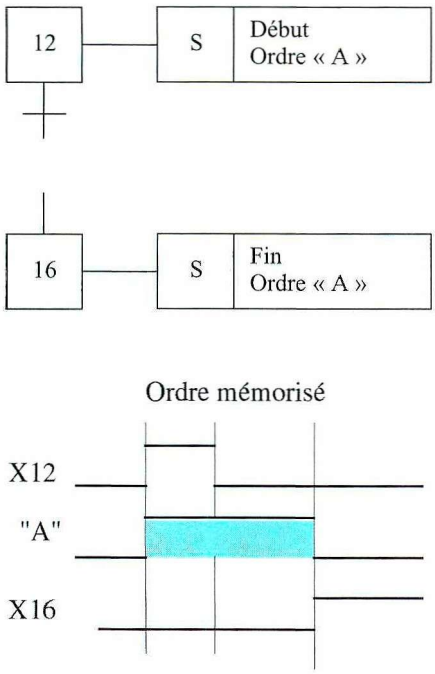


Figure 2-33 : ordre mémorisé (S : stored)

L'ordre est émis et maintenu à l'état « vrai » dès que l'étape 12 est active (mise à 1), l'ordre est supprimé et maintenu à l'état « faux » dès que l'étape 16 est active (mise à 0).

Il est possible d'associer plusieurs lettres pour une même action, à ce moment là, l'ordre de placement des lettres a une influence sur le résultat.

- La figure 2-34 montre un ordre mémorisé par l'activité de l'étape 12, mais qui sera émis seulement si la condition « a » est vraie; dans ce cas, l'ordre est toujours mémorisé (comme l'indique le logigramme) par l'activité de l'étape.

- La figure 2-35a montre un ordre qui sera mémorisé par l'activité de l'étape 12 ***et*** la condition « a ». Si la condition et la variable d'étape ne sont pas vraies en même temps (figure 2-35b), l'ordre ne sera jamais émis.

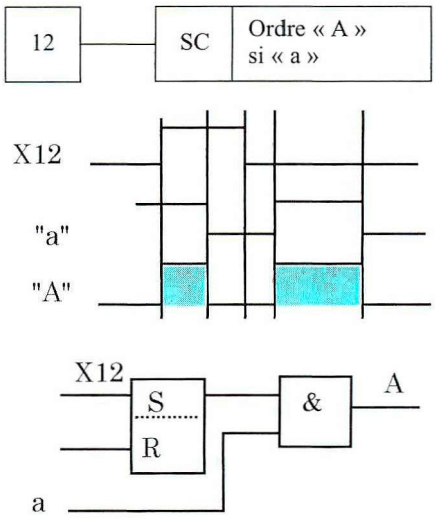


Figure 2-34 : ordre mémorisé et conditionnel

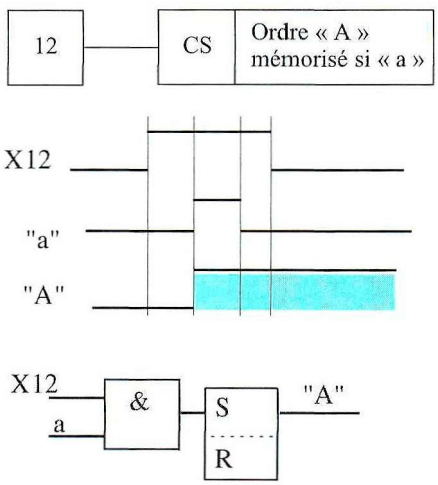


Figure 2-35a : ordre mémorisé à condition.

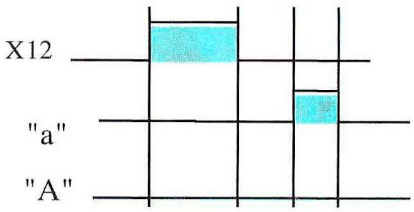


Figure 2-35b : ordre mémorisé à condition

2.2.3. Les éléments de simplification graphique

L'utilisation des macroreprésentations permet de structurer l'analyse et autorise une démarche progressive du général vers le détail. Les notions de tâche et de macroétape [GRE.85] ne sont pas définies par la norme ; la CEI/IEC 848 définit la réutilisation d'une séquence et la représentation détaillée d'une étape. L'utilisation des graphismes associés aux tâches et macroétapes peut faire l'objet d'une convention de représentation entre utilisateurs dans la mesure ou cela peut faciliter la lecture d'un grafcet.

2.2.3.1. Réutilisation de la même séquence

Une séquence qui se produit plusieurs fois peut être représentée à chaque occasion par un seul symbole d'étape avec un symbole d'ordre simple.

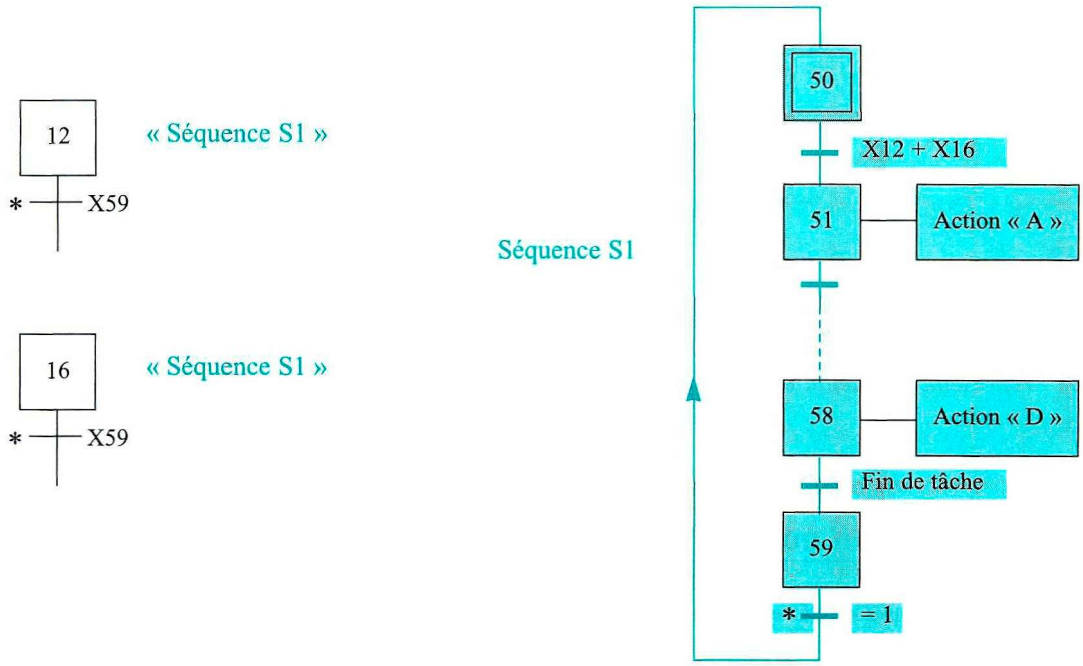


Figure 2-36 : réutilisation d'une séquence

La séquence S1 est « appelée » par les étapes 12 et 16 du graphe principal ; pendant le déroulement de la séquence, l'étape d'appel (12 ou 16 dans cet exemple) reste active. Lorsque la séquence est terminée, la variable de coordination (X59 dans cet exemple) devient vraie et les deux graphes évoluent de manière synchrone ; l'astérisque permet de repérer **les transitions des deux graphes** qui doivent être obligatoirement franchies simultanément. La réceptivité toujours vraie (=1) placée après l'étape de coordination crée une situation instable à chaque fin de séquence.

Le passage à « 1 » de la variable X59 n'est pas perceptible de l'extérieur et ne peut donc pas émettre d'ordre. Comme l'indique le chronogramme de la figure 2-37, la sortie S(X59) correspondante à cette étape reste à « 0 ».

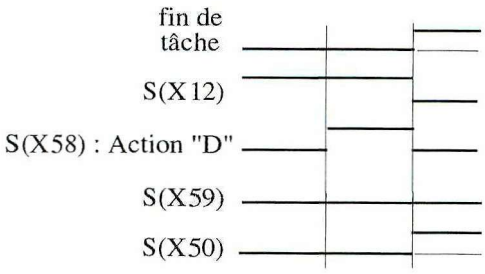


Figure 2-37 : Chronogramme de fin de séquence

2.2.3.2. Représentation détaillée d'une étape

La représentation détaillée d'une étape permet, lorsque cela devient nécessaire à la compréhension, de détailler un ordre (ou une action) de niveau supérieur en plusieurs ordres (ou actions) associés aux étapes intermédiaires.

La norme ne précise pas la façon dont il faut appréhender la différence entre l'étape et sa représentation détaillée.

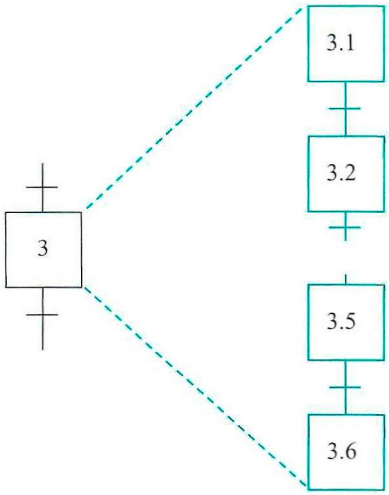


Figure 2-38 : représentation détaillée d'une étape

Il semble raisonnable d'appliquer ici les règles de fonctionnement de la macro-étape; c'est-à-dire que l'étape non détaillée 3 doit être considérée comme une ***contraction graphique*** d'une partie de grafcet dans un but de simplification de représentation.

En conséquence, une étape non détaillée n'aurait donc pas d'existence réelle et il serait impossible de lui affecter une variable d'étape. La variable X3 n'existerait pas dans l'exemple de la figure 2-38, l'étape non détaillée 3 ne pourrait être ni active ni inactive; le comportement dynamique du grafcet ne pourrait être étudié qu'à partir de la représentation détaillée, les variables X3.1, X3.2, ..., X3.6 sont disponibles et utilisables.

2.3. Autres concepts non normalisés

En 1998, le projet de norme 3B/215/CD est en préparation à partir de la documentation UTE C03-191. Il reprend partiellement les travaux menés par le groupe « GRAFCET » en 1993.

Ce projet devrait être l'occasion d'une refonte complète de la version 1988 de la norme CEI/IEC 848 (qui devient CEI/IEC 60 848) et d'une harmonisation avec la CEI/IEC 1131-3 (tout en insistant sur les différences qui les séparent). Le document final contiendra sans aucun doute, sous une forme peut-être différente, la définition d'éléments dont l'usage est très répandu. Les éléments présentés ci-dessous sont extraits du document UTE C03-191 qui peut servir de base de travail (en complément de la norme CEI 60 848 de 1988).

2.3.1. Notions graphiques

2.3.1.1. Extension du concept général d'étape

Création de l'étape source et de l'étape puits :

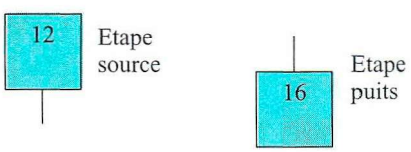


Figure 2-39 : étapes source et puits

Une étape source n'est reliée à aucune transition amont, de ce fait, elle ne peut être activée que par un ordre de forçage ou à l'instant initial si elle est initiale. Une étape puits n'est reliée à aucune transition aval, elle ne peut être désactivée que par un ordre de forçage.

Une étape peut être source et puits, dans ce cas elle permet de spécifier des comportements combinatoires.

2.3.1.2. Extension du concept général de transition

Création de la transition source et de la transition puits :

Figure 2-40 : transitions source et puits

Une transition source est toujours validée, on lui associe généralement une réceptivité de type front afin de limiter le nombre de franchissements. Une transition puits n'est reliée à aucune étape aval, son franchissement désactive la ou les étapes amonts. Une transition ne peut pas être source et puits.

2.3.1.3. Définition de la macro-étape

La macro-étape est définie de façon plus rigoureuse que l'étape « non détaillée » et le symbole correspondant est créé (figure 2-41).

La macro-étape est l'unique représentation d'un ensemble unique d'étapes et de transitions nommé « expansion de macro-étape »; cet ensemble commence par une seule étape d'entrée et se termine par une seule étape de sortie qui constituent les seules connexions structurelles avec le grafcet auquel appartient la macro-étape.

La variable X3 n'existe pas dans l'exemple de la figure 2-41, l'étape 3 n'existe que virtuellement et dire qu'elle est active ou inactive n'a aucun sens.

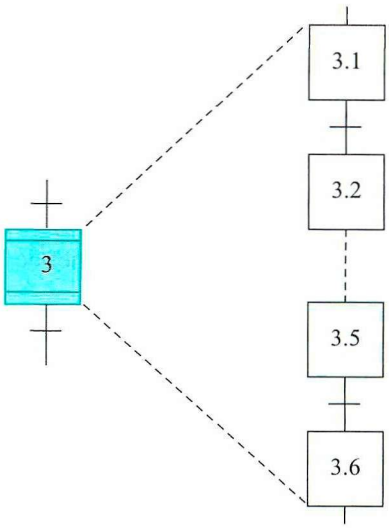


Figure 2-41 : macro-étape

2.3.2. Notions hiérarchiques

2.3.2.1. Structure d'un grafcet global

Un grafcet global (figure 2-43) est constitué par l'ensemble des grafcets partiels spécifiant le fonctionnement de l'équipement de commande. Un grafcet partiel est un ensemble de grafcets connexes; un grafcet connexe (figure 2-42) est tel qu'il existe un lien graphique entre tous les éléments qui le constituent.

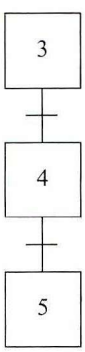


Figure 2-42 : grafcet connexe

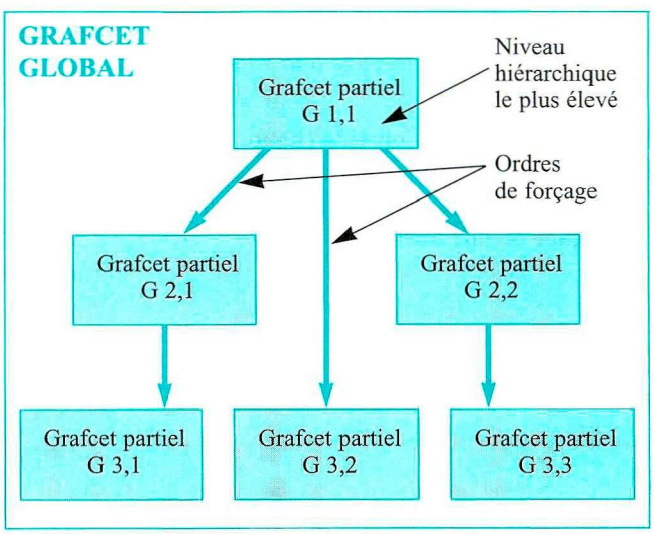


Figure 2-43 : grafcet global

La hiérarchisation d'un grafcet global est obtenue par l'utilisation d'ordres de forçage, elle permet de structurer l'analyse et de construire le grafcet spécificateur à partir de l'analyse des modes de marche et d'arrêt du système spécifié.

La liaison renforcée entre le GEMMA et le grafcet global permet généralement d'obtenir une sûreté de fonctionnement supérieure; il est malgré tout assez difficile (dans l'état actuel de l'offre constructeur) d'obtenir une réalisation dont la structure soit identique à celle de la spécification, cela crée très souvent une distance non négligeable entre le comportement réel et le comportement spécifié de la partie commande.

Le chapitre 6 est consacré à l'étude de cette difficulté.

2.3.2.2. Ordres de forçage

L'ordre de forçage est un ordre interne dont l'exécution est prioritaire sur l'application des règles d'évolution. Le diagramme fonctionnel forcé ne peut pas évoluer tant que l'ordre de forçage est présent. Utiliser un ordre de forçage implique un niveau hiérarchique plus élevé pour le diagramme fonctionnel émettant l'ordre de forçage. Les ordres de forçage sont émis ***à l'intérieur du grafcet global*** d'un grafcet partiel vers un autre grafcet partiel de niveau hiérarchique inférieur.

L'ordre de forçage est représenté par le symbole « F/» suivi du repère alphanumérique du grafcet forcé et de la situation forcée entre accolades ; l'ensemble est placé dans un double rectangle.

Les ordres de forçage sont au nombre de quatre :

- Ordre d'initialisation (figure 2-44). Les étapes initiales du grafcet partiel forcé sont activées, toutes les autres sont désactivées.

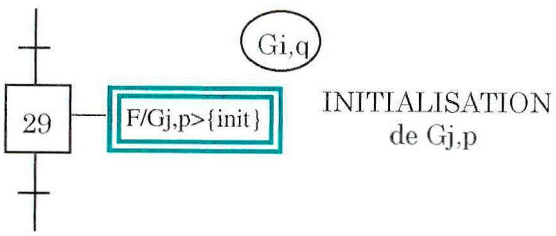


Figure 2-44 : forçage à la situation initiale

- Forçage à la situation vide (figure 2-45). Les étapes du grafcet partiel forcé sont toutes désactivées ; le redémarrage ne pourra être obtenu que par un autre ordre de forçage ou une transition source.

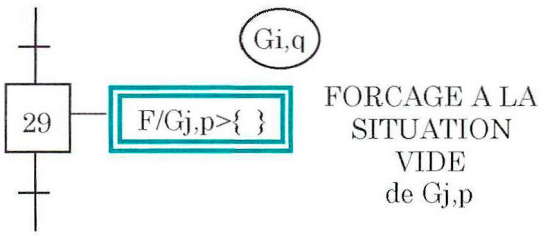


Figure 2-45 : forçage à la situation vide

- Forçage à une situation donnée (figure 2-46). Les étapes du grafcet partiel forcé dont les repères sont indiqués entre accolades sont activées, toutes les autres sont désactivées.

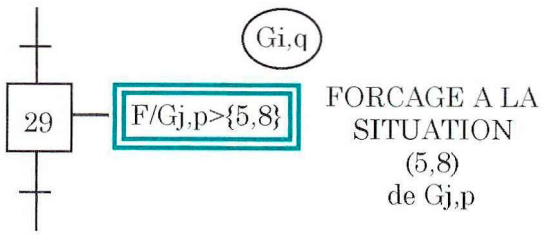


Figure 2-46 : forçage dans une situation donnée

- Forçage à la situation « courante » (figure 2-47). Le grafcet partiel forcé garde la situation qu'il avait au moment ou l'ordre de forçage est émis. Une étoile entre accolades symbolise la situation forcée.

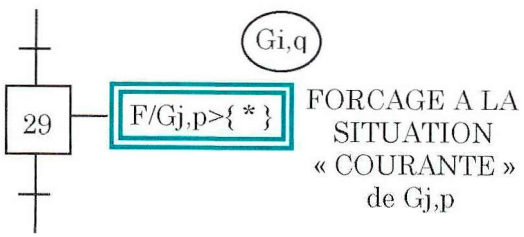


Figure 2-47 : forçage à la situation courante

2.3.3. Notions temporelles

Un système spécifié par un grafcet a été isolé ; la frontière d'isolement définit une partition de l'univers en un interne au modèle et un externe. Chaque partie de cet univers possède sa propre échelle des temps et l'isolement du système à spécifier permet donc de créer une échelle des temps interne au modèle et une échelle des temps extérieure au modèle. Ces deux échelles de temps sont sans commune mesure.

- Postulat 1 : A l'échelle du temps externe, tout changement d'état des entrées est pris en compte par le modèle dès son apparition. La totalité des conséquences de cet événement sur le modèle est déterminée à temps nul. Depuis l'extérieur du modèle, les événements d'entrée et les états des sorties qui en résultent sont vus à la même date.

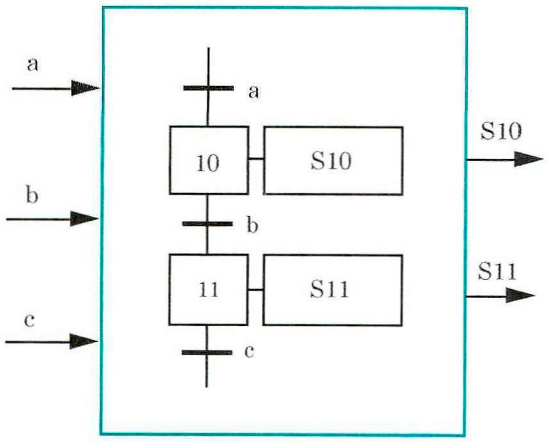


Figure 2-48 : frontière d'un système

Le chapitre 3 est entièrement consacré à la notion de frontière.

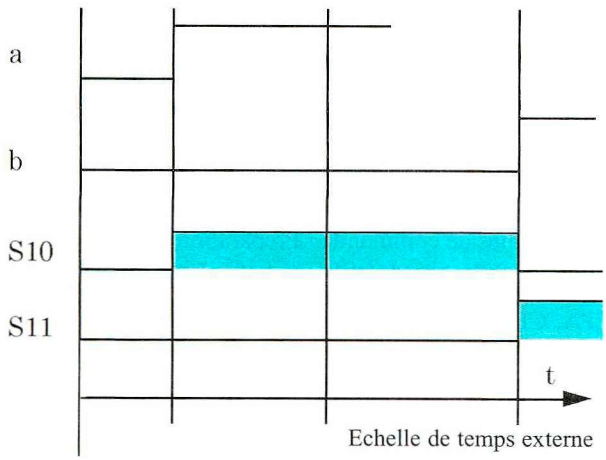


Figure 2-49 : évolution des sorties en fonction des entrées

- Postulat 2 : à l'échelle interne des temps, la durée de franchissement d'une transition est aussi petite que nécessaire mais jamais nulle. La durée minimale pendant laquelle la variable associée à une étape est vraie ne sera jamais nulle.

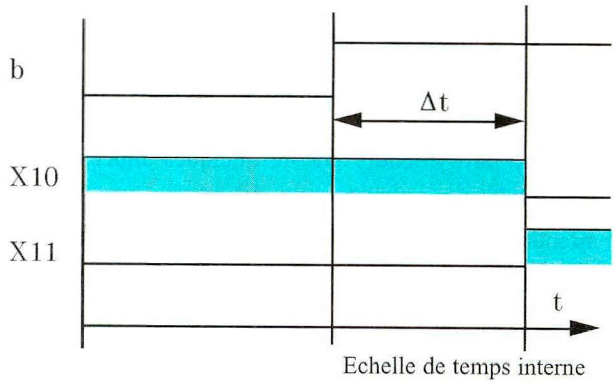


Figure 2-50 : durée de franchissement d'une transition

A l'échelle du temps interne, ***dans un grafcet global***, les transitions franchissables sont franchies de manière synchrone.

2.3.4. Notion de stabilité

Une situation est stable à un instant donné si aucune transition n'est franchissable ; les étapes actives pendant une situation stable émettent les ordres qui leurs sont associés.

Une situation est instable si, lorsqu'elle est atteinte, une transition devient franchissable sans occurrence d'événement extérieur [MON.83]. Dans ce cas, les ordres externes associés aux étapes « actives » ne sont pas émis.

L'ordre de forçage est un ordre interne, de ce fait, il peut être émis pendant une situation instable.

2.4. Quelles normes utiliser ?

Une norme est toujours le résultat d'un compromis entre industriels aux intérêts divergents. La CEI/IEC 848 n'échappe pas à la règle, son contenu n'est pas en phase avec les besoins pratiques et l'état des connaissances sur le Grafcet. Nous pouvons reprocher à la norme CEI 848 de ne pas aborder les problèmes temporels, ne pas permettre une structuration véritable de l'analyse et, enfin, d'être souvent trop floue pour lever certaines ambiguïtés dans l'interprétation des spécifications. Il semble que la nouvelle version, qui peut se faire attendre encore quelques années, puisse combler toutes ces lacunes.

En attendant mieux, la version actuelle de la CEI/IEC 848 permet de bâtir un enseignement à partir d'une référence reconnue au niveau international. Il semble en effet indispensable que tous les postulants aux baccalauréats STI, STL et Professionnels maîtrisent les éléments de la norme actuelle ; ces derniers deviennent insuffisants en post-bac, et l'utilisation des notions présentées dans le document UTE C03-191 (qui n'est pas une norme mais qui devrait être une référence conventionnelle) est alors nécessaire.

Remarque : dans la suite de l'ouvrage, seront utilisés les éléments normalisés de la CEI 60848 complétés par les extensions proposées au paragraphe 2.3.

2.5. Références bibliographiques

[BLA.79] « Comprendre, maîtriser et appliquer le GRAFCET », M. BLANCHARD, CEPADUES Editions, Collection Automatisation et Production, 1979, page 7 ;

[CEI.75] Vocabulaire électrotechniqne international, norme internationale CEI 50, 1975, chapitre 351 : commande et régulation automatique ;

[CEI.88] « Etablissement des diagrammes fonctionnels pour systèmes de commande / Preparation of function charts for control systems », Norme Internationale / International Standard, CEI/IEC 848[3], 1988, 99 pages ;

[GRE.85] « Le GRAFCET : de nouveaux concepts », GREPA, CEPADUES Editions, Collection Automatisation et Production, Décembre 1985, page 56 ;

[MON.83] « Monographie des travaux sur le GRAFCET depuis la Norme C03-190 », Chapitre 1 : « Les interprétations algébriques et algorithmiques et les temporisations du GRAFCET », Document de synthèse proposé par le groupe « Systèmes logiques » de l'AFCET, Montpellier, Juin 1983, pages 2 à 22 ;

[NFC.82] « Diagramme fonctionnel GRAFCET pour la description des systèmes logiques de commande », Norme Française NF C03-190, UTE[4], Juin 1982, 30 pages ;

[NFE.93] « Automates programmables – Partie 3 : Langages de programmation », Norme Française et Norme Européenne NF EN 61131-3, CENELEC[5]; Version française de la norme CEI/IEC 1131-3, Juillet 1993, 202 pages ;

[UTE.93] « Établissement des diagrammes fonctionnels pour systèmes de commande – Diagramme fonctionnel GRAFCET. Extension des concepts de base » Documentation de référence (Documentation et symboles graphiques) UTE C03-191, Juin 1993, 35 pages.

3. Bureau Central de la CEI – 3, rue Varembé – GENEVE – SUISSE
4. UTE – Cedex 64 – F-92052 PARIS LA DEFENSE
5. Secrétariat Central du CENELEC – rue de Stassart – B-1050 BRUXELLES

CHAPITRE 3

LES FRONTIERES DE DESCRIPTION

CHAPITRE 3
LES FRONTIERES DE DESCRIPTION

La notion de frontière de description est un élément important durant toute la phase de conception. Une ambiguïté présente à ce niveau peut entraîner des interprétations erronées (que décrit-on ?). Le paragraphe 3.2. traitera de ce problème en liant frontières de description et points de vue. Toutefois, depuis son origine, le Grafcet et les concepts associés ont évolué ; un certain nombre de notions ont été reprises dans des normes successives (voir chapitre 2) ; d'autres pourtant couramment admises restent l'objet d'extensions possibles ; aussi, il nous apparaît utile de dresser un rapide bilan de ce qui est communément considéré au niveau du Grafcet en ce qui concerne les notions de frontières ; c'est l'objet du paragraphe 3.1.

3.1. Frontières de description et modèle Grafcet

3.1.1. Perception des « Frontières de description » dans le modèle Grafcet

En tant que modèle, le Grafcet est défini par une représentation graphique qui traduit le comportement attendu du système modélisé et ce, via ses règles d'évolution. On en parle généralement par référence à la notion de ***structure***.

Le comportement ne prend un sens que par l'intermédiaire d'une interprétation décrite en termes d'actions qui caractérisent les sorties du modèle et de réceptivités prenant en compte les entrées du modèle. On parle alors de son ***interprétation***.

Ce dernier point laisse apparaître naturellement la notion de ***« frontières de description »*** comme l'élément permettant de *définir précisément ce dont on parle*, avec l'introduction d'un ensemble de concepts classiques intervenant dans toute modélisation et qui vont être repris au paragraphe 3.2.

Les terminologies initiales parlent d'entrées/sorties booléennes ou logiques et de modélisation de systèmes logiques de commande.

On peut toutefois considérer que le terme ***« booléen »*** au sens de l'algèbre des propositions (à savoir *vrai* ou *faux*) s'avère ici le mieux approprié. En effet, il fait référence à une notion d'état (état d'entrée, état de sortie) dont les changements créent le caractère événementiel qui apparaît dans la notion de systèmes réactifs. Il se différencie de la réalisation (état *0* ou *1*) comme cela est mis en évidence dans le typage des langages informatiques modernes (exemple, cas du VHDL).

Toutefois, compte tenu des notions de fronts supportés par le Grafcet, des extensions de l'algèbre de Boole doivent être prises en compte pour traduire l'approche événementielle [ROU.93].

A titre d'exemple (ici extrait de l'application n° 2 décrite au chapitre 7), dans la conception, il est intéressant de considérer au niveau fonctionnel, l'information *« température supérieure à 55 °C »*; une variable booléenne (*vrai/faux*) y est associée et son évolution temporelle est prise en compte dans l'évaluation des réceptivités. Des raisonnements similaires peuvent être appliqués aux sorties.

La figure 3-1 donne une perception possible de ces différents concepts. Dans le modèle Grafcet, sont incluses structure et interprétation, la structure (graphique composé d'étapes, transitions et liaisons orientées) ne traduisant un comportement attendu qu'avec la prise en compte de l'interprétation. C'est à ce niveau que sont définies les entrées/sorties du système.

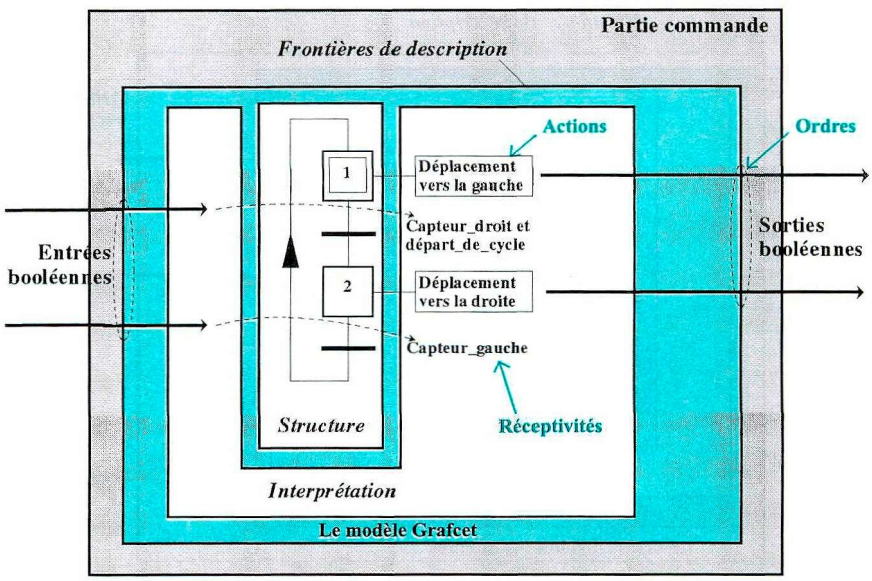


Figure 3-1 : perception du modèle Grafcet

Ainsi, les rectangles *« actions »* décrivent les comportements attendus (ce qui doit être fait). L'ordre qui y correspond sera émis ou non et représente dès lors une grandeur booléenne de sortie [G7W.92]. Pour les fonctions opératives associées (comme les temporisations, les comptages), la terminologie de « commande » est parfois utilisée.

Les réceptivités correspondent à des grandeurs booléennes résultant de l'évaluation d'une proposition logique où interviennent entrées booléennes et caractère actif ou inactif d'étapes.

Si le modèle Grafcet est utilisable pour une description du comportement d'un système, il est plus particulièrement employé pour une description partielle de la partie commande, ceci justifie notre choix d'un bloc « partie commande » qui inclut la description Grafcet dans la figure 3-1.

Des modules fonctionnels d'évaluation des réceptivités et de mise en forme des ordres peuvent y être associés d'où la perception du modèle Grafcet donnée à la figure 3-2 et proposée dès les publications initiales [BLA.79].

Pour ces modules fonctionnels, on parle aussi de combinatoires d'entrée et de sortie.

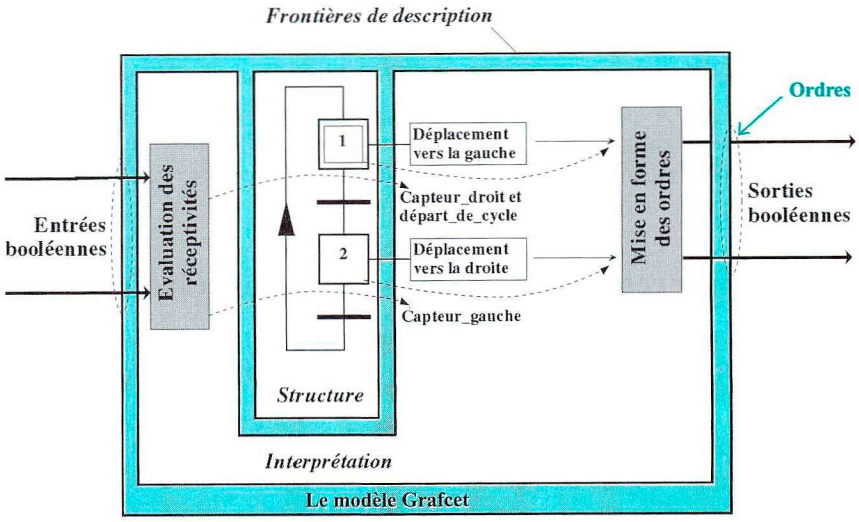


Figure 3-2 : perception étendue du modèle Grafcet

3.1.2. Perception des « Frontières de description » au travers des normes relatives au Grafcet

Comme décrit dans le chapitre 2, l'ensemble des commentaires émis dans le paragraphe 3.1.1. apparaît globalement dans les normes ou projets de normes successifs.

Un élément primordial non encore introduit ici est la définition d'actions normalisées (paragraphe 2.2.2.). Celles-ci peuvent être traduites par l'adjonction d'un bloc de mise en forme en sortie du modèle Grafcet tel que défini précédemment (figure 3-3). Les distinctions entre actions, commandes et ordres [CEI.88] peuvent apparaître comme liées à la phase de modélisation décrite.

Quant aux réceptivités, elles peuvent prendre toute forme d'évaluation d'une grandeur booléenne y compris un schéma de réalisation à partir de symboles graphiques normalisés proches d'une réalisation.

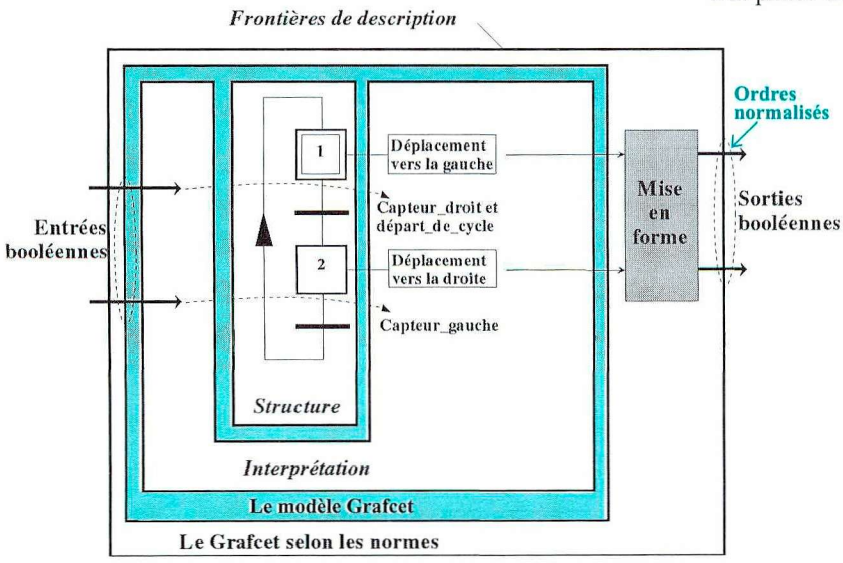


Figure 3-3 : perception du modèle Grafcet au niveau des normes

3.1.3. Influence des postulats temporels

Le paragraphe 2.3.3. reprend un ensemble des notions temporelles précisées au niveau du Grafcet. Largement admises depuis leur publication dans la documentation UTE C03-191, elles introduisent une séparation temporelle liée implicitement aux frontières d'isolement du modèle. Il convient de bien noter les implications induites; en particulier, au niveau :

- des entrées non corrélées, le modèle ne tolère pas leur évolution simultanée (nécessité de dates externes distinctes);
- de l'évolution interne, celle-ci est suffisamment rapide pour prendre en compte toute modification des entrées;
- des sorties, les ordres ne sont émis que si les situations sont stables [G7W.92] ce qui peut apparaître en contradiction avec des textes antérieurs [BLA.79] (prise en compte des notions d'actions ponctuelles selon le niveau de conception).

Ces points peuvent influencer la structure du grafcet proposé en solution d'un problème.

3.1.4. Extension du Grafcet et frontières de description

Des propositions d'extension existent (paragraphe 2.3.) et reprennent partiellement des travaux menés et ayant acquis un consensus au sein de la communauté « GRAFCET ».

Ces propositions telles que connues actuellement ne modifient pas les notions énoncées dans ce qui précède.

3.2. Frontières de description dans le concept de modélisation par Grafcet

3.2.1. Position du problème

La notion de système a été définie au paragraphe 1.1.1. Lors de sa conception ou de son étude, une spécification demande une vision claire des besoins à satisfaire ou des objectifs à atteindre (valeur ajoutée) mais aussi de ses frontières c.-à-d. de la séparation existant entre le système et l'environnement ou milieu extérieur dans lequel il est situé.

Cette définition de ***frontières*** ne peut s'obtenir qu'en caractérisant au mieux les milieux qu'elles séparent selon l'un ou l'autre point de vue sous lequel les intervenants utilisateur-concepteur se placent pour exprimer leurs souhaits ou besoins.

Lors de cette spécification, toute approche fonctionnelle vient mettre en évidence des ***composants*** (ou *entités*, *blocs*) apportant chacun une relation de type *« entrées-sorties »*, les évolutions temporelles de ces dernières pouvant être symbolisées grâce à des notions de ***« flux »***.

Dans le cadre d'un système automatisé de production (figure 3-4), de tels concepts peuvent être appliqués avec mise en évidence de flux d'échanges aux frontières.

Poursuivant cette démarche, le système automatisé de production est communément vu comme l'association d'une partie opérative et d'une partie commande pour chacune desquelles il convient de préciser les frontières.

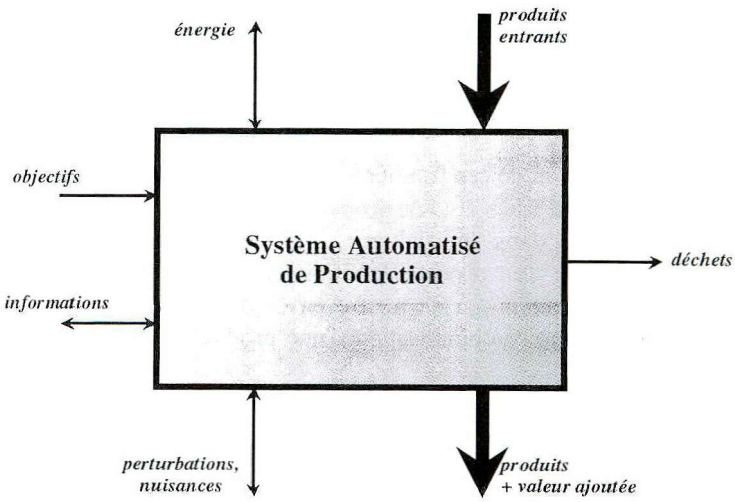


Figure 3-4 : spécification d'un système automatisé de production – Les flux d'échanges

Ainsi, la figure 3-5 montre la prise en compte de flux internes traduisant les ordres donnés à la partie opérative au travers de préactionneurs et les comptes rendus reçus au travers de capteurs.

Dans la réalité, la structuration d'un système automatisé est la résultante de l'association de divers constituants physiques comme montré à la figure 3-6 (*pour de plus amples informations, se référer au paragraphe 1.1.2.1.*), un grand nombre d'entre eux pouvant ne pas être perçus en début de conception. En effet, dans toute démarche de conception hiérarchique, il est courant d'accroître progressivement la précision de la description et dans une telle optique, la structuration suivie conduit à isoler progressivement des sous-systèmes procédant entre-eux à des échanges de divers flux.

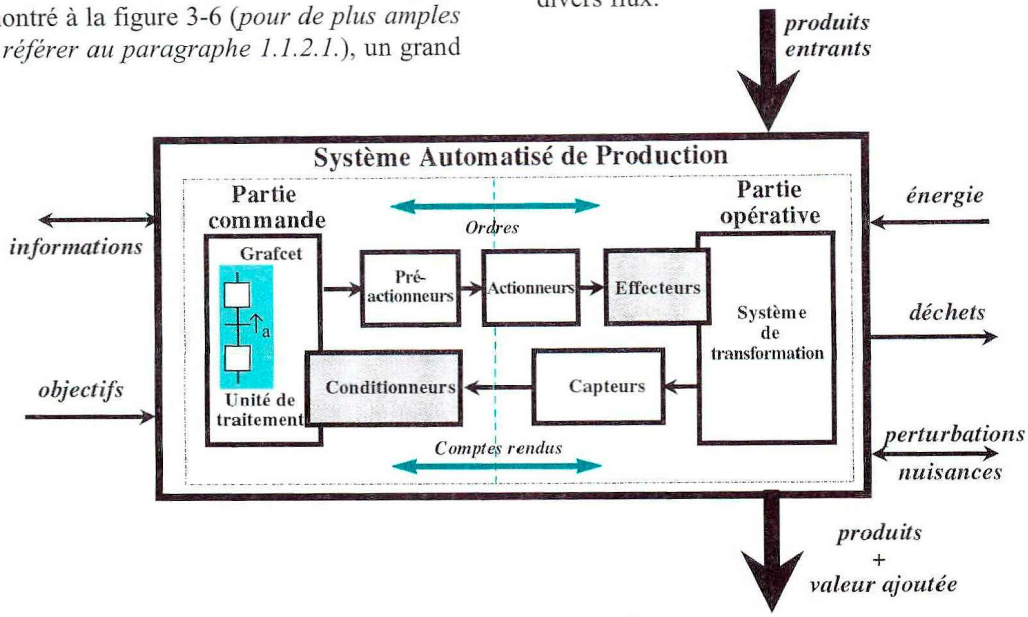


Figure 3-5 : prise en compte des flux internes

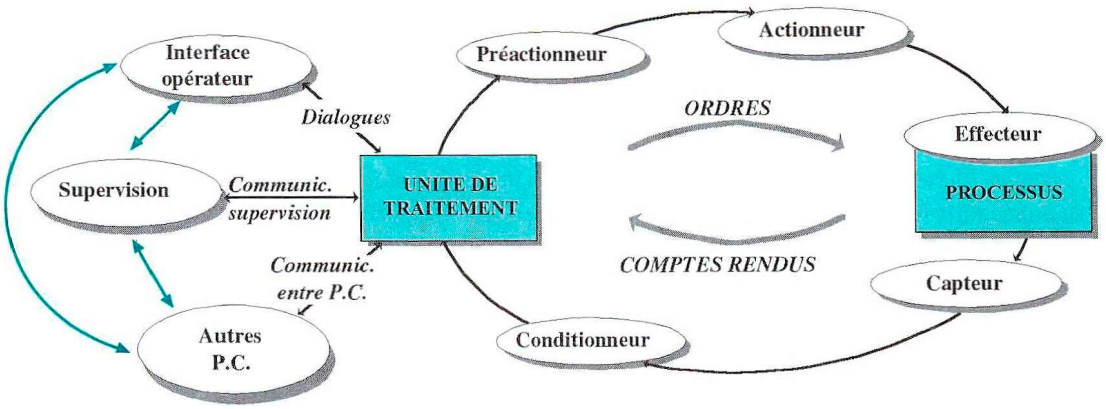


Figure 3-6 : constituants physiques d'un système automatisé

Dans la définition de ces frontières, divers aspects peuvent intervenir :

- A l'origine, dans le dialogue utilisateur-concepteur, interviennent des aspects fonctionnels ou physiques. Ainsi, il est commun de mettre en évidence deux cas extrêmes dans l'automatisation d'une production industrielle :
  - *le système de production existe* avec ses organes comme effecteurs, certains actionneurs et capteurs : l'expression de la fonctionnalité est alors fortement influencée par les constituants de cette partie opérative comme l'emplacement où sera situé le système, la technologie utilisée dans la partie opérative, les dialogues opérateur, ... Le concepteur interviendra principalement dans le choix de constituants d'interfaces entre partie opérative – partie commande (préactionneurs, capteurs, conditionneurs) et de moyens de traitement. En général, ce cas permet d'exprimer explicitement dès l'origine les contraintes d'échange aux frontières de la partie commande.
  - *le système de production n'existe pas :* en général, l'approche fonctionnelle ne fait intervenir que des frontières au niveau global du système. La conception débute par une phase d'évaluation de solutions techniques opératives pouvant satisfaire aux objectifs à atteindre. L'expression des contraintes d'échange aux frontières de la partie commande ne sera que très progressive.

- Dès que l'on souhaitera modéliser le comportement de l'ensemble, le modèle utilisé pourra introduire de nouvelles contraintes comme la nature des *grandeurs* ou *objets* manipulés. Ainsi, par sa définition, tout ***modèle réactif*** a pour seule exigence de pouvoir décrire le comportement dynamique de systèmes à temps de réponse contraint par leur environnement tandis qu'une approche selon un ***modèle logique*** impose de ne prendre en compte que des objets booléens sous la forme de leur état, voire éventuellement de leur changement d'état et ce, entre autres, au niveau des entrées/sorties.

3.2.2. Modélisation et frontières de description

Conceptuellement, pour obtenir toute modélisation d'un système, on a besoin :

- d'un **objectif de description** du système (existant ou à concevoir),
- dans un **contexte** qui permettra d'en définir les frontières de description,
- selon un **niveau de représentation** qui prendra en compte divers aspects.

Dans ce type d'approche, il est courant d'admettre la présence d'un observateur qui en décrit une vision partielle selon un angle de vue lié aux flux d'échanges mis en relation (figure 3-7) ce qui nécessite implicitement la prise en compte de la notion de frontière.

En effet, pour éviter toute ambiguïté, il est courant de préciser la position de cet observateur (notion habituellement rencontrée dans la littérature) ; plus impérativement, l'orientation de son angle de vue (à quels flux d'entrée et de sortie est relative cette observation) apparaît opportune pour lever toute ambiguïté ; on s'y référera dans ce qui suit. Dans cette figure et les suivantes, la zone en vert est ce que l'on essaie de préciser, de définir ; on parlera de « zone occultée ».

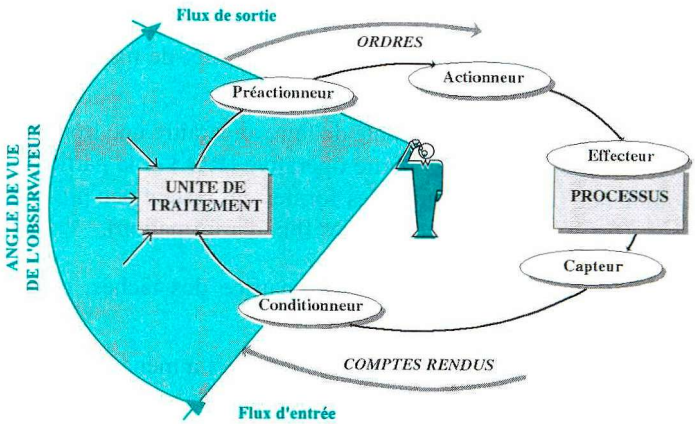


Figure 3-7 : observation partielle d'un système automatisé en vue d'en assurer la description selon un point de vue donné

Parmi les différents aspects pris en compte dans le cadre de la description d'un système automatisé de production, on peut citer :

- le point de vue,
- le niveau de spécification,
- le degré de finesse.

3.2.2.1. Le point de vue

Il caractérise une approche prise par l'observateur pour s'impliquer dans la description d'un système, à savoir l'expression d'un besoin de traitement de flux (de matière et/ou d'information). Ainsi, il est courant de rencontrer en conception des points de vue système, partie opérative, partie commande mais on peut aussi exprimer des points de vue opérateur, agent de maintenance, ...

- Le point de vue de description le plus général est le ***point de vue système*** qui ne considère que la connaissance des éléments intervenant dans le processus symbolisé, à ce stade, les composants d'automatismes ne pouvant y être précisés.

Il est alors admis ici que l'observateur est extérieur au système [GRE.85] et s'attache à décrire le procédé mettant en évidence les fonctions principales, les tâches exécutées, leur coordination. Pour ce faire, le concepteur va devoir rechercher les solutions techniques possibles pour chacune des tâches à exécuter en respectant un ensemble de contraintes qu'il conviendra d'énoncer. A ce niveau, les frontières du système sont à prendre en compte de même que peuvent déjà apparaître des frontières internes liées à l'organisation du processus.

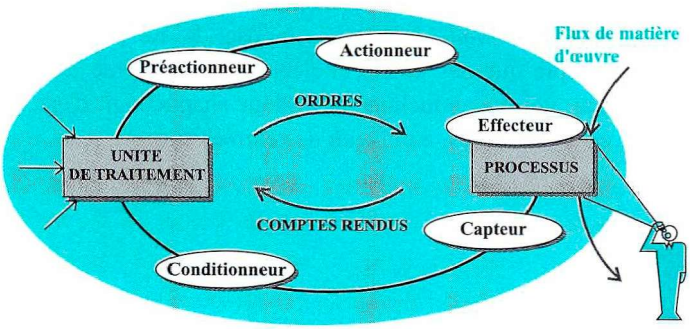


Figure 3-8 : le point de vue système

Ainsi, dans la figure 3-8, l'observateur ne traduit qu'une approche basée sur la transformation des flux de matières d'œuvre (vision du procédé).

Progressivement, il est possible de faire apparaître une frontière d'isolement entre la partie opérative (**P.O.**) et la partie commande (**P.C.**) mais sous des formes qui restent peu précises (figure 3-9, transfert vers les flux d'information).

Considérant la **P.C.** comme coordinatrice des tâches, on peut concevoir :

- que ses sorties sont les tâches opératives à mener.
- que ses entrées sont un ensemble d'informations à prélever sur la **P.O.** pour s'assurer de mener à bien le procédé (état des matières, avancement des tâches).

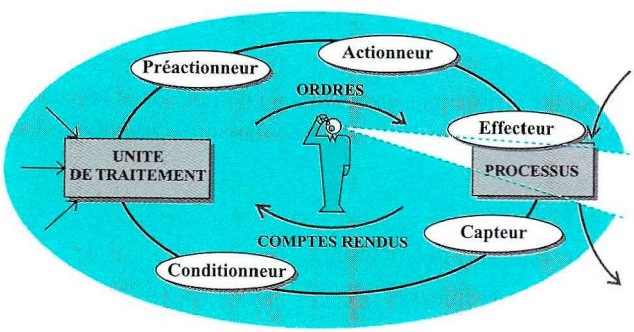


Figure 3-9 : le point de vue système : première approche d'une frontière P.O.-P.C.

- Le point de vue ***partie opérative*** prend en compte les éléments d'automatisation appartenant à la partie opérative : effecteurs, actionneurs par les effets attendus, certaines parties des capteurs (par la nature des informations transmises à la **P.C.** [*voir remarques du 3.3.3.*]) et préactionneurs (par la nature des actions à entreprendre pour obtenir les effets) (figure 3-10).

L'observateur s'implique dans le bon fonctionnement de la partie opérative. Il décrit le comportement attendu de la **P.C.** (c.-à-d. les ordres qu'elle doit émettre) pour obtenir les effets souhaités sur la **P.O.** [GRE.85] et ce, sur base de comptes rendus fournis par cette dernière.

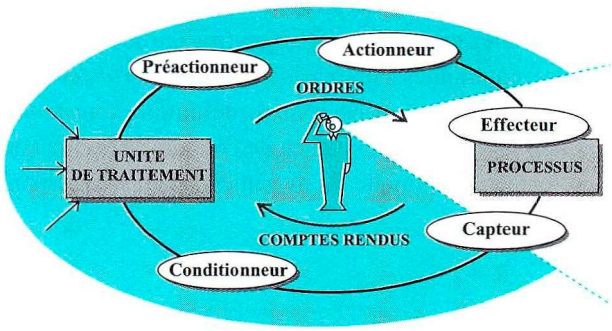


Figure 3-10 : le point de vue partie opérative

- Le point de vue ***partie commande*** prend en compte les particularités des constituants opératifs de la partie commande qui devront fournir des ordres par l'intermédiaire de signaux à la partie opérative ou exécuter certaines tâches comme comptage et temporisation (figure 3-11).

L'observateur s'implique dans le bon fonctionnement de la partie commande [GRE.85]. Il décrit un comportement détaillé de la **P.C.** prenant en compte les spécifications technologiques et opérationnelles de la **P.O.** et de la **P.C.**

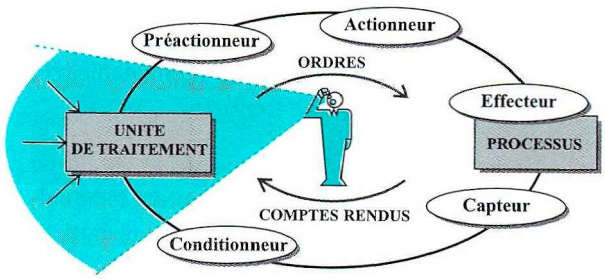


Figure 3-11 : le point de vue partie commande.

Outre ces 3 points de vue communément abordés dans une phase de conception, d'autres peuvent aussi être mis en exergue comme des points de vue liés à la fonction humaine, par exemple :

- Le point de vue ***opérateur*** qui fera intervenir des aspects opérationnels du système tels que :
  - la surveillance du processus,
  - des interventions manuelles telles que le chargement et/ou le déchargement du processus,
  - l'intervention relative à des marches particulières ou à des arrêts d'urgence.
- Le point de vue ***agent de maintenance*** qui est lié au maintien du système dans un fonctionnement correct, facilitant :
  - la recherche de pannes,
  - l'amélioration du processus,
  - la disponibilité.

3.2.2.2. Le niveau de spécification

Il est soit fonctionnel, technique, technologique ou opérationnel.

- La description fonctionnelle ne considère aucune prise en compte du matériel et s'avère rapidement limitée tant elle est conceptuelle.
- On en viendra rapidement à une description technique qui établit les principes mis en œuvre pour résoudre les objectifs initiaux auxquels doit satisfaire le système.

Les fonctions nécessaires et leur répartition ainsi que leur connectivité sont alors obtenues.

Il faut noter que cette description technique n'est pas habituellement isolée dans la littérature mais se trouve incluse soit dans la description fonctionnelle, soit dans la description technologique (ce qui est une confusion entre méthode et moyens).

- La description technologique considère la prise en compte de choix technologiques.
- Le niveau de spécification opérationnel tient compte des particularités de fonctionnement du matériel (temps de réponse des composants, caractéristiques des signaux, ...) chaque composant de la chaîne de commande étant relié aux autres en situation de fonctionnement.

3.2.2.3. Le degré de finesse

Il traduit le niveau de détail dans la représentation.

Une vision globale du système est nécessaire pour permettre, dans les systèmes complexes, une compréhension et/ou une appréhension progressive. Elle permet en outre, d'aborder une structuration progressive des modèles utilisés pour les représenter (utilisation conjointe de plusieurs modèles ou concepts de structuration comme la macro-étape dans le Grafcet).

Si l'on s'intéresse à l'évolution du niveau de représentation selon ces trois aspects précités, la progression n'est pas uniaxiale c.-à-d. qu'on n'évolue pas indépendamment selon chacun des axes ici définis. Elle n'est pas non plus transversale c.-à-d. simultanément équivalente selon chaque axe.

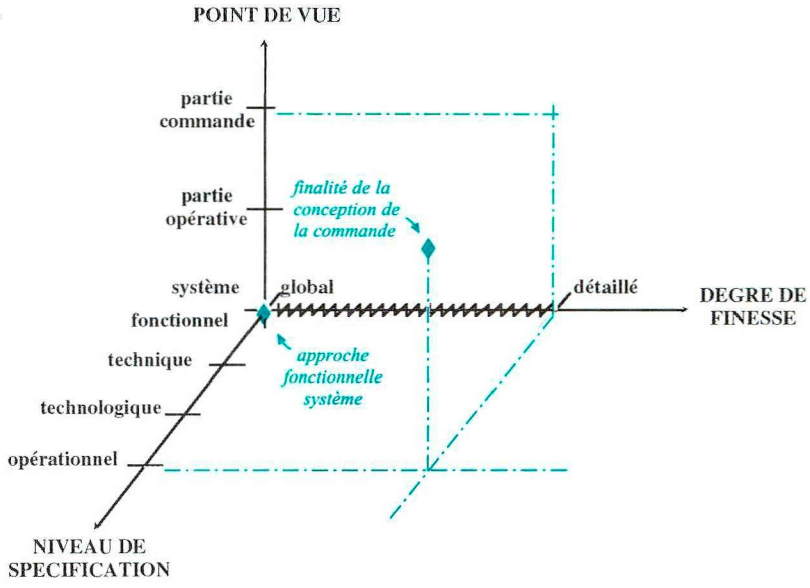


Figure 3-12 : quantification de l'évolution d'une modélisation

Elle fluctue en fonction du niveau d'approfondissement des connaissances du système, en partant d'une description générale (vision fonctionnelle et globale du système) pour arriver à une description précise (vision détaillée du comportement de la partie commande en situation opérationnelle). La figure 3-12 illustre ce propos.

Au cours de cette évolution, l'aspect *« frontières de description »* est donc susceptible d'évoluer. Pour rappel, par sa définition, le modèle Grafcet ne prend en compte que des objets booléens sous la forme de leur état ou de leur changement d'état. Ce dernier peut donc influencer l'aspect *« frontières de description »* dès que ce type de représentation est abordé.

A titre d'illustration, deux exemples extraits des applications (chapitre 7) vont être présentés. Ceux-ci ne sont pas représentatifs d'une démarche unitaire et systématiquement applicable. Il faut remarquer que l'originalité d'une conception réside généralement dans un savoir faire propre à chaque individu et lié aux moyens dont il dispose.

3.3. Exemple relatif à l'application n° 1 – Machine à assembler

3.3.1. Elément décrit

On décrit ici l'élaboration du système d'alimentation en vis du poste 1 (chapitre 7 – application n° 1). Pour ce faire, le choix initial s'est porté sur une solution technique comportant un bol vibrant permettant d'alimenter le tiroir de sélection (d'alimentation). Sur celui-ci, le choix d'un vérin pneumatique est pris en compte pour amener une vis devant l'axe de prise du manipulateur (figure 3-13).

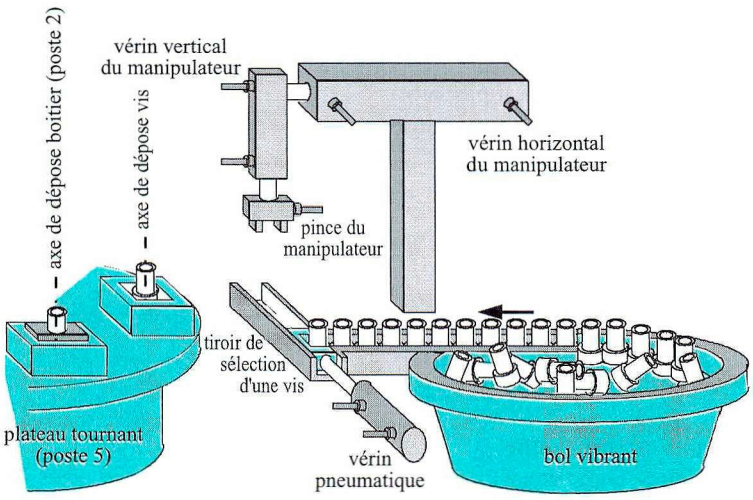


Figure 3-13 : système d'alimentation en vis du poste N° 1

3.3.2. Points de vue et frontières de description

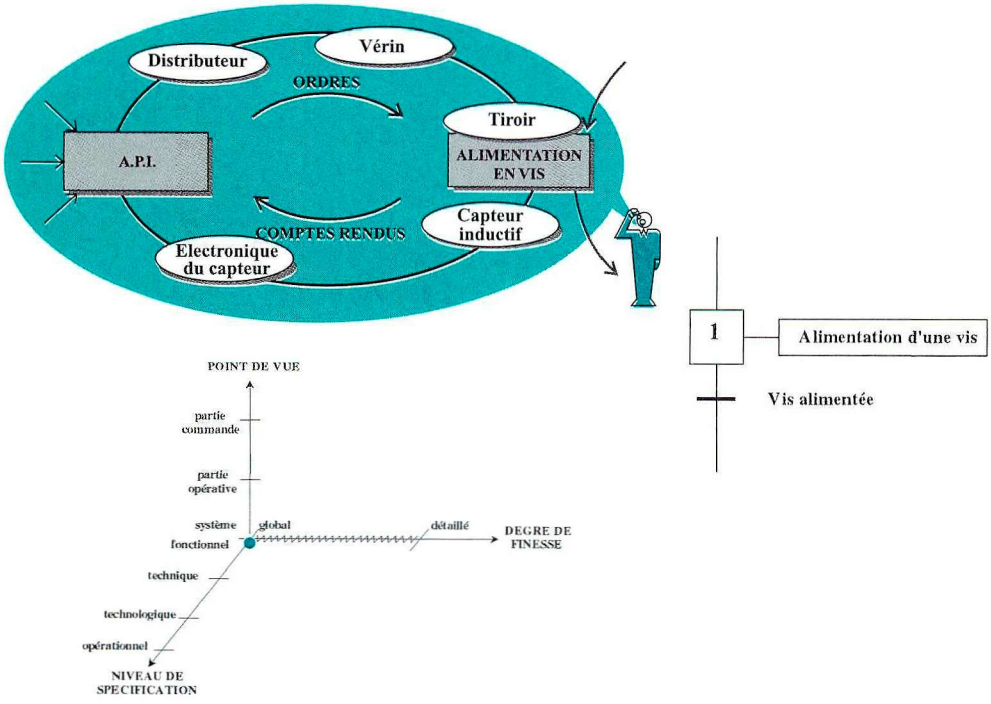


Figure 3-14 : point de vue système

On associera ici la description Grafcet, le point de vue avec ses frontières de description ainsi que la progression dans la description.

Le point de vue ***système*** est abordé de façon générale en considérant ce poste comme un sous-système de l'ensemble. La figure 3-14 en donne une première représentation utilisable au niveau de la coordination des tâches. On considère l'opération d'alimentation en vis et la vérification de la présence d'une vis. On est à un niveau de spécification fonctionnel et sans aucun degré de finesse. Les flux d'entrée et de sortie pris en compte sont ici typiquement de la matière d'œuvre (non descriptibles en Grafcet).

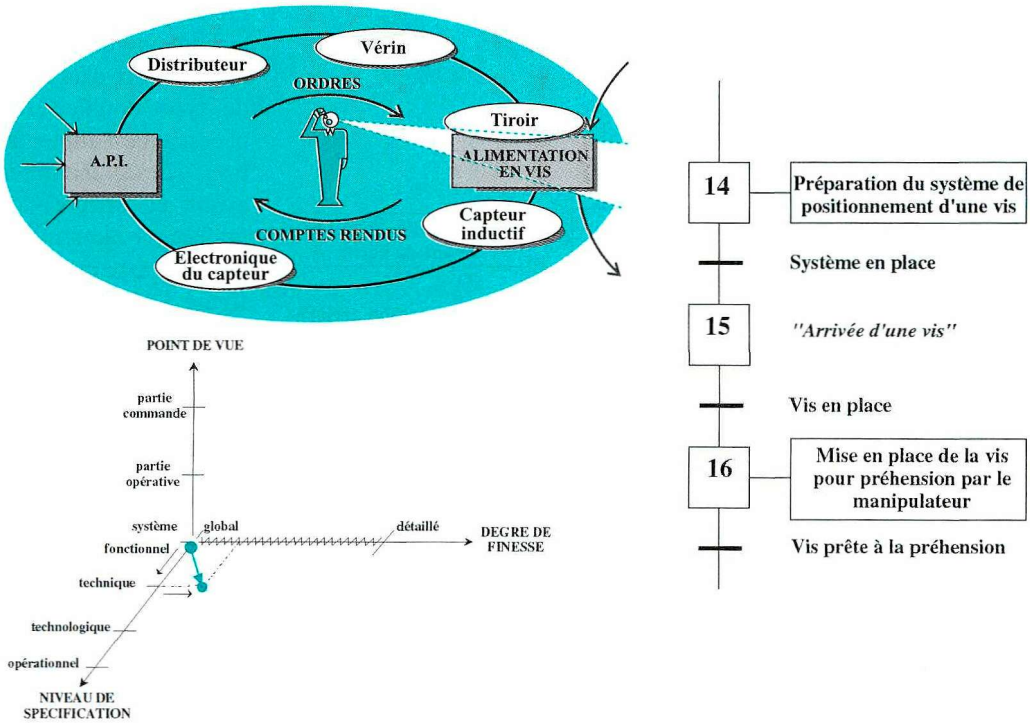


Figure 3-15 : point de vue système étendu

Le fonctionnement de ce sous-système peut alors être détaillé en considérant ses diverses composantes sous leur aspect technique (figure 3-15).

Ainsi, il convient de mettre une vis et une seule en position devant le préhenseur (manipulateur).

L'arrivée d'une vis dans le tiroir est engendrée par une technique d'alimentation par bol vibrant dont la commande n'est pas produite par le système étudié. Pour ce dernier, l'étape **15** est une étape d'attente et par conséquent aucune action n'y est associée ; on illustre cela en associant un commentaire à cette étape.

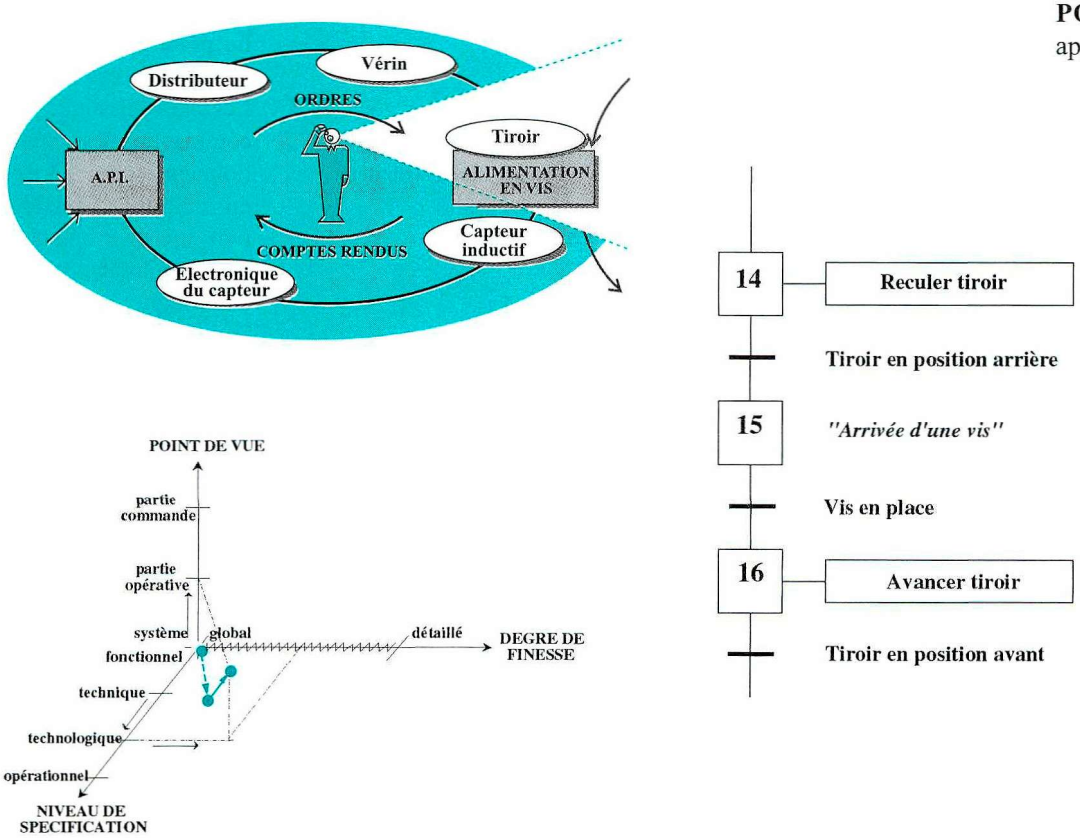


Figure 3-16 : point de vue partie opérative

Des flux informationnels relatifs à des échanges **PC-PO** peuvent ainsi déjà apparaître.

Le choix de solutions technologiques (bol vibrant, tiroir d'amenée avec vérin pneumatique) permet de définir les commandes nécessaires ainsi que les informations utiles à prélever. Le point de vue ***partie opérative*** est ainsi abordé (figure 3-16).

On y note l'introduction d'éléments technologiques de la solution (partie opérative) augmentant ainsi le degré de finesse.

Prenant en compte la technologie des actionneurs (choix d'un vérin de type double effet nécessitant l'alimentation des chambres avant et arrière), le grafcet est alors modifié comme le montre la figure 3-17.

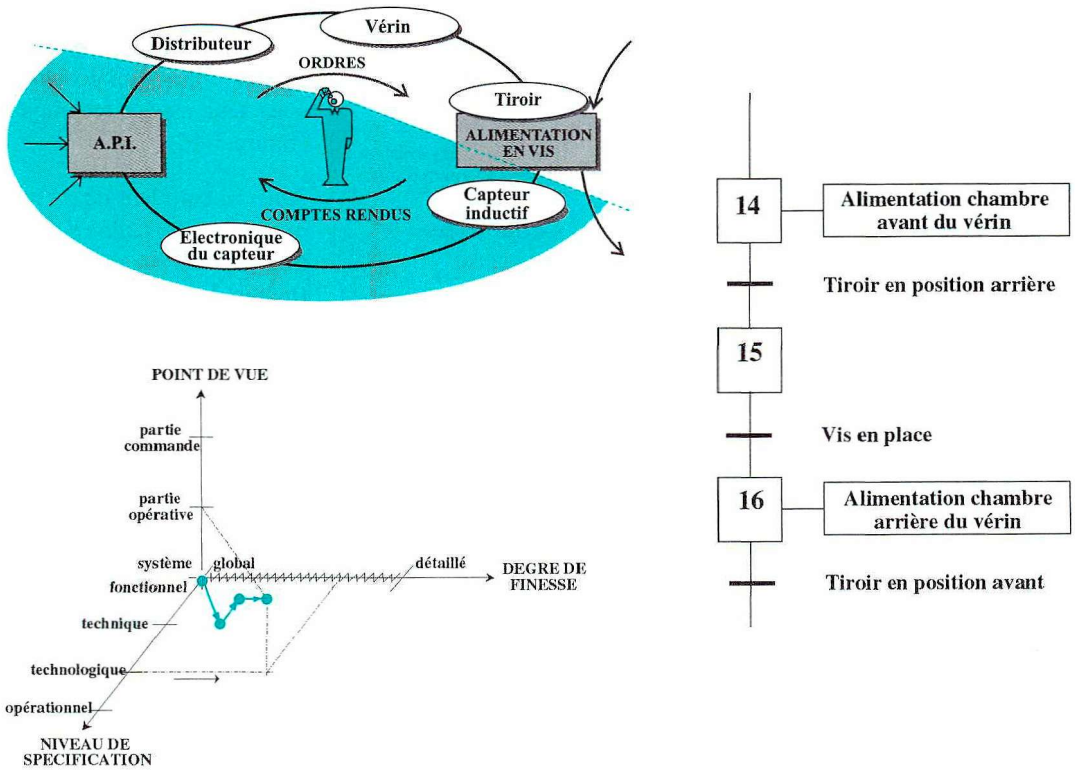


Figure 3-17 : point de vue partie opérative étendue aux actionneurs

Le point de vue ***partie commande*** est abordé. Les caractéristiques de commande des préactionneurs sont ici prises en compte. Considérant un distributeur à double pilotage (nécessitant donc 2 ordres de commande) et le temps de réponse des bobines relais (inférieur à 0,2s), on obtient le grafcet de la figure 3-18.

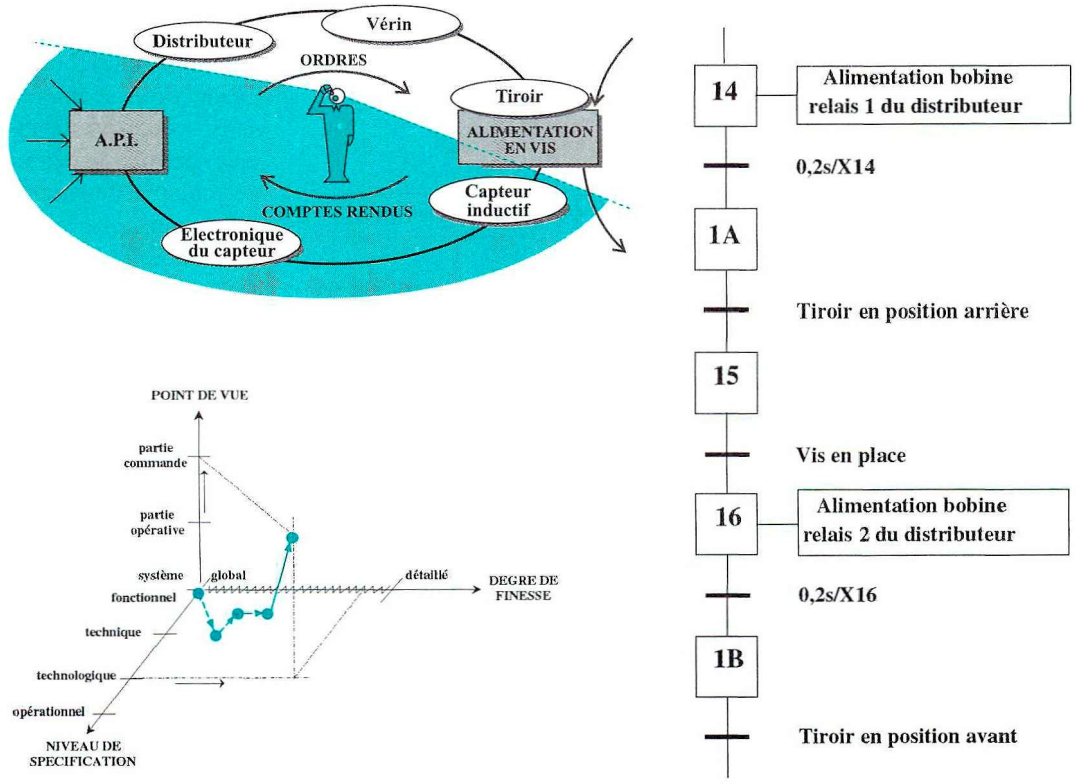
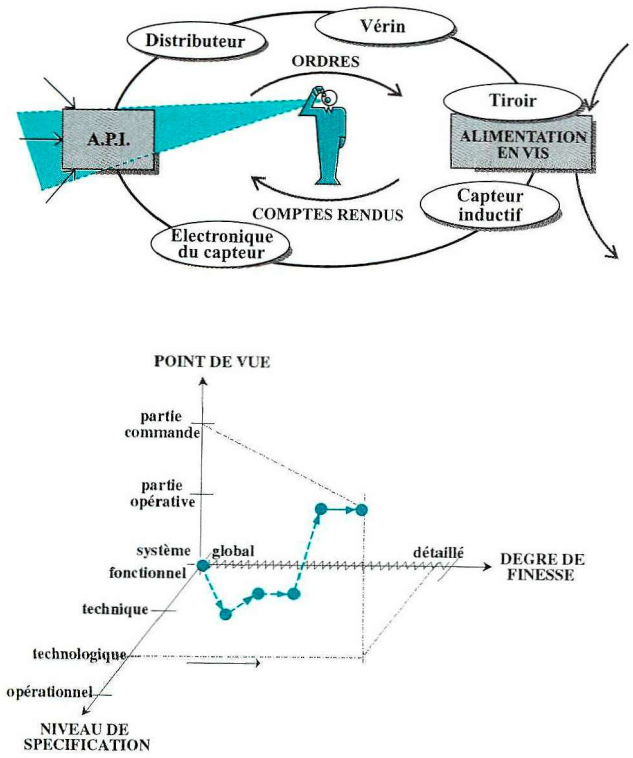
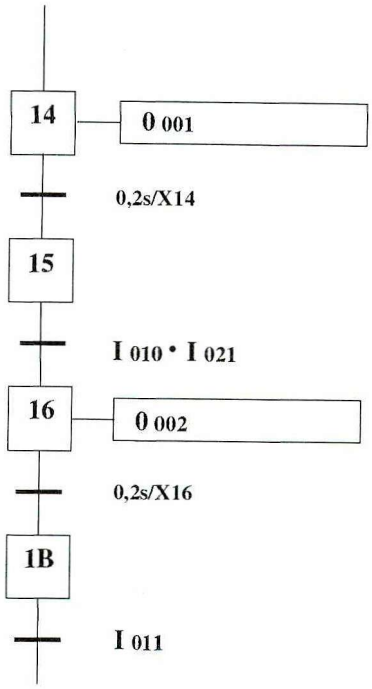


Figure 3-18 : point de vue partie commande (les capteurs ne sont pas encore définis)



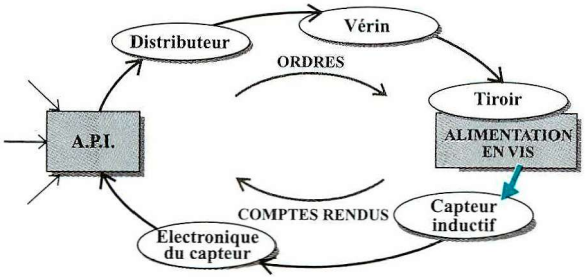


En complétant par le choix de capteurs dont l'influence sur les frontières sera abordée au paragraphe 3.3.3., on obtient la description finale donnée à la figure 3-19. On y note l'introduction d'une numérotation des entrées et des sorties de type « carte d'A.P.I. », respectivement pour l'élaboration des réceptivités et des actions ; on peut dès lors s'appuyer sur une telle description pour une programmation d'A.P.I.

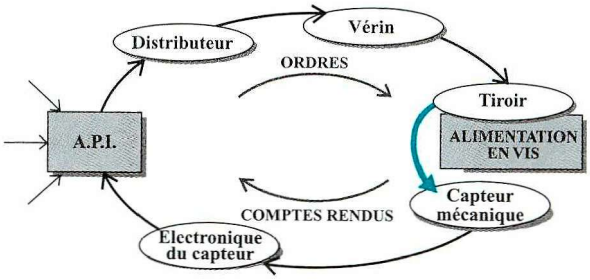
Figure 3-19 : point de vue partie commande (limitée à l'automate, les capteurs sont définis)

3.3.3. Choix d'un capteur et frontières de description

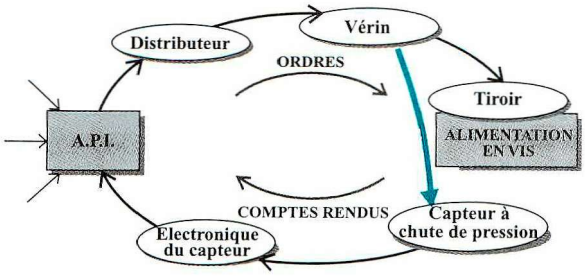
Le choix d'un type de capteur peut modifier la vision du réel dont la partie commande dispose vis-à-vis du processus commandé.



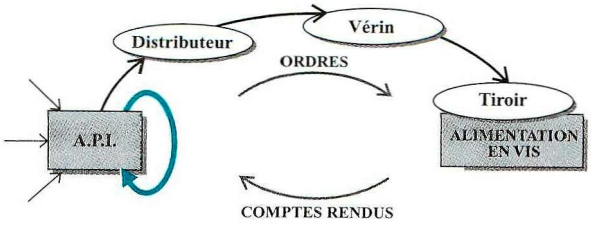
Capteur inductif à l'endroit où se trouve la vis



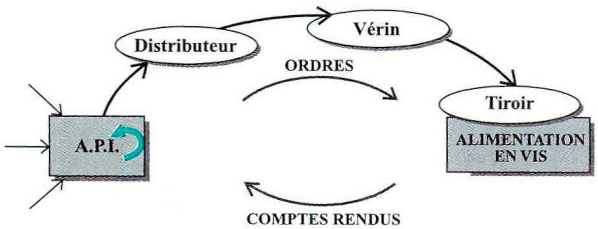
Capteur mécanique à contact sur l'extrémité du tiroir d'alimentation



Capteur à chute de pression sur l'orifice du vérin



Etat d'une sortie de l'A.P.I. testée via entrée



Utilisation d'une variable de temporisation

Figure 3-20 : vision assurée par un capteur

Ainsi, la figure 3-20 reprend diverses solutions de capteurs possibles pour déterminer la présence d'une vis prête à la préhension.

Des caractéristiques opérationnelles peuvent alors être prises en compte pour définir ce choix (sûreté du fonctionnement).

A priori, sauf la solution du capteur inductif à l'endroit où la vis se trouve, aucune autre solution ne garantit une présence effective d'une vis pour la préhension. Il convient d'en examiner les conséquences pour l'ensemble du processus. Ceci peut conduire à une nouvelle structuration des grafcets élaborés afin d'éviter des anomalies dans le fonctionnement de l'ensemble (faux cycles de production, existence de modes dégradés, ...).

3.4. Exemple relatif à l'application n° 2 – Réchauffeur

3.4.1. Elément décrit

On traitera ici du système de contrôle des rejets en condensats d'un système thermique (chapitre 7 – application N° 2). Initialement, sa spécification oblige à assurer des rejets dans un circuit dit de piscine, dont la température reste inférieure à 60 °C.

3.4.2. Points de vue et frontières de description

On peut ainsi donner une représentation de la spécification du système au niveau de la fonctionnalité à assurer telle que reprise à la figure 3-21.

Le concepteur va dans une première phase rechercher des solutions techniques possibles pour assurer le refroidissement des condensats en tenant compte de l'ensemble des contraintes imposées.

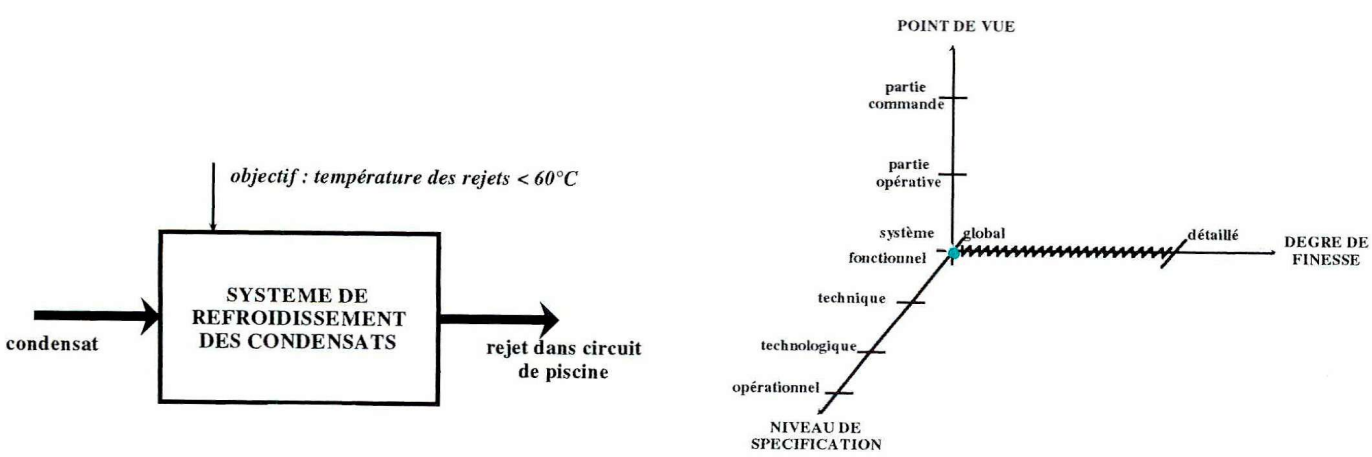


Figure 3-21 : spécification fonctionnelle

Parmi les solutions techniques, le choix se porte ici sur un mélangeur alimenté en eau de ville. Pour répondre à ces besoins, les grandeurs d'entrée seront :

- les condensats d'entrée,
- l'alimentation en eau de ville.

Les grandeurs de sortie peuvent se limiter aux rejets dans le circuit de piscine dont la température est l'élément important et qui en nécessite dès lors la mesure. Le choix d'une solution technique peut conduire à préciser ou modifier certaines contraintes imposées en particulier sur l'environnement (figure 3-22). Le point de vue ***« système »*** est ici conservé.

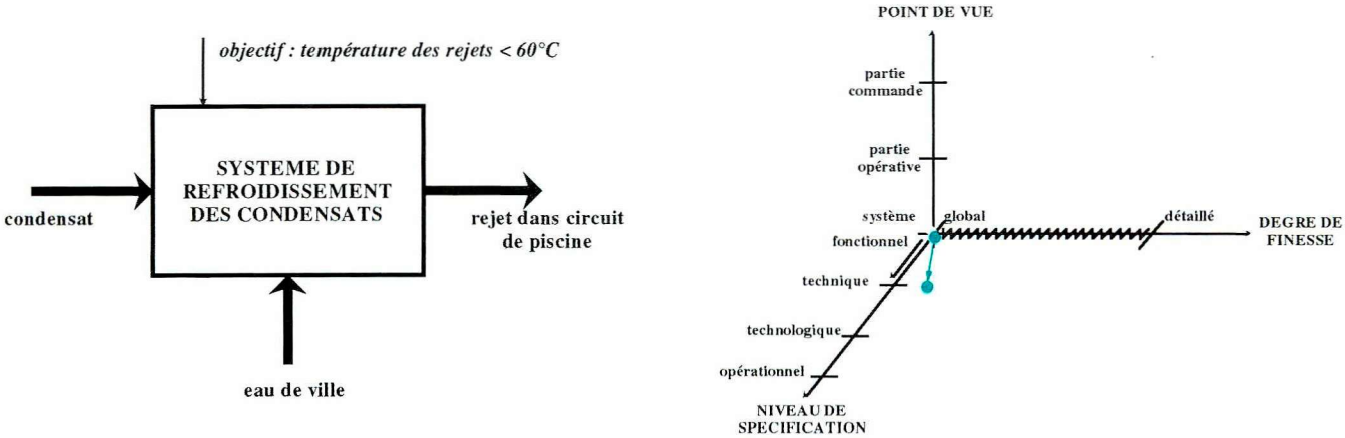


Figure 3-22 : spécification prenant en compte une solution technique

Cette solution technique peut alors être précisée. Ainsi, ici, le concepteur opte pour un principe de contrôle par *tout-ou-rien* de l'injection de l'eau de mélange (figure 3-23).

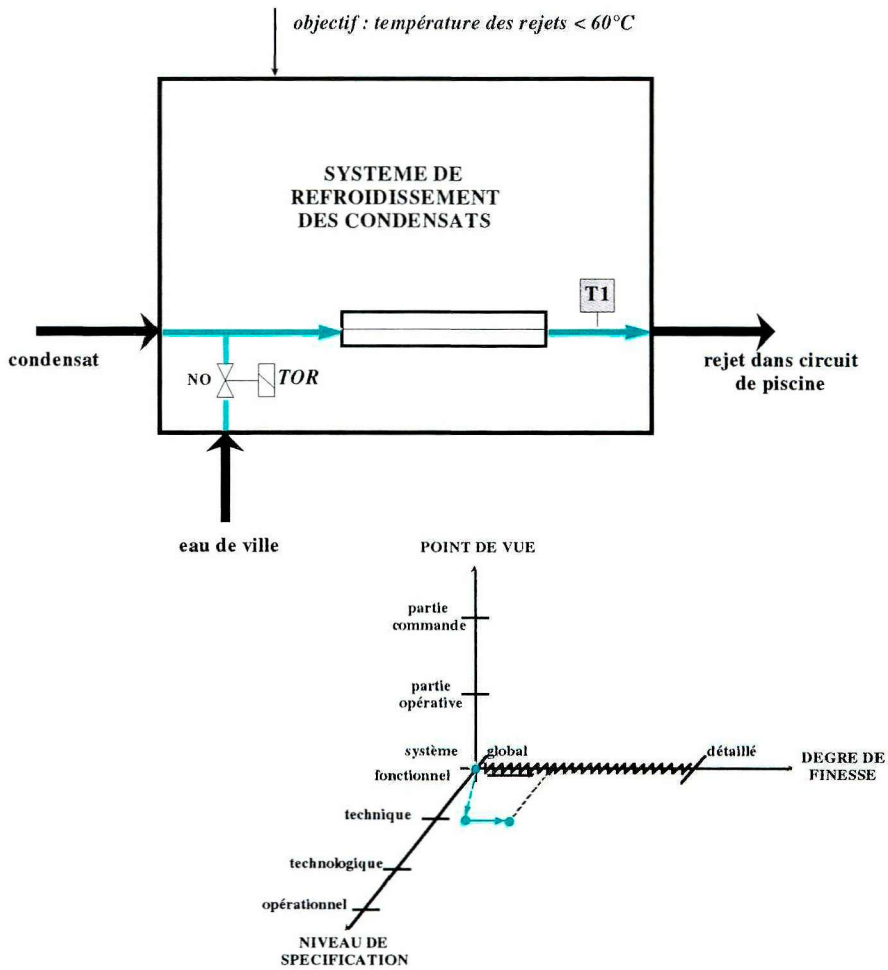
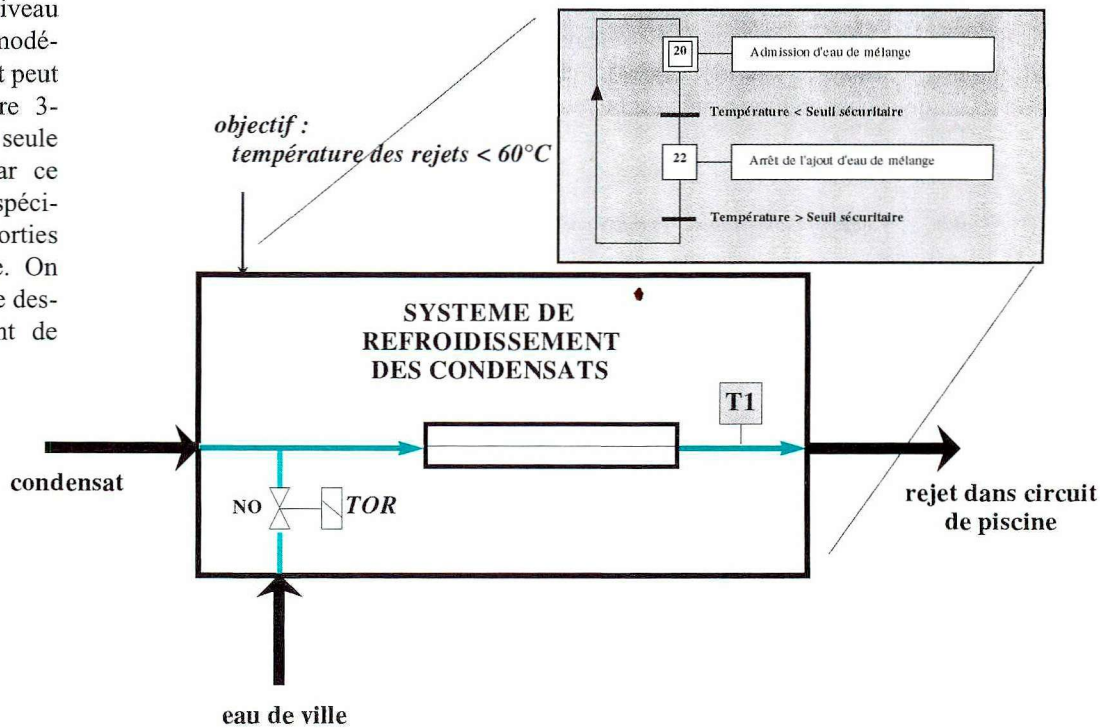
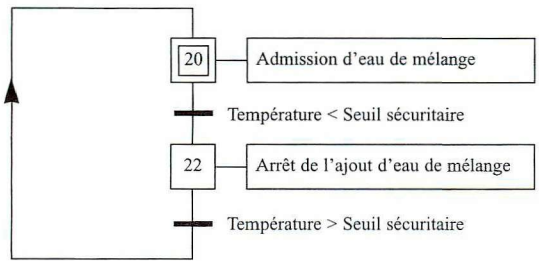


Figure 3-23 : spécification prenant en compte une solution technique précise

A partir d'un certain niveau de spécification, une modélisation de type Grafcet peut ici être donnée (figure 3-24). Pour rappel, la seule contrainte imposée par ce modèle est de pouvoir spécifier ses entrées et sorties sous forme booléenne. On reste toutefois dans une description sous un point de vue *« système »*.





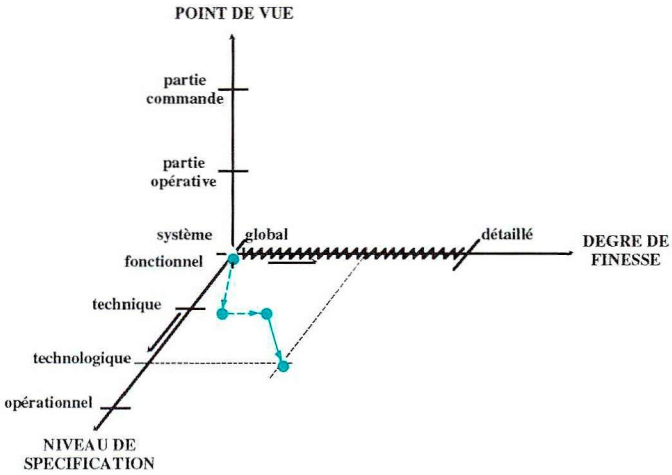


Figure 3-24 : modélisation par Grafcet selon le point de vue « système »

Le point de vue ***« partie opérative »*** vient préciser les caractéristiques techniques et/ou technologiques des constituants sélectionnés pour répondre au problème posé. Ainsi, dans cet exemple, la mesure de température est réalisée par un thermostat.

En conséquence, vu les constantes de temps mises en jeu dans ce type de processus et compte tenu de l'aspect sécuritaire du système étudié, on ne procède pas à l'arrêt immédiat de l'admission de l'eau de mélange dès que le basculement du thermostat est constaté mais bien après une temporisation liée aux éléments technologiques qui seront mis en œuvre. Par contre, durant cette phase de temporisation, si le seuil vient à être franchi vers le haut, l'admission d'eau de mélange sera immédiatement rétablie. On obtient ainsi le grafcet modifié de la figure 3-25.

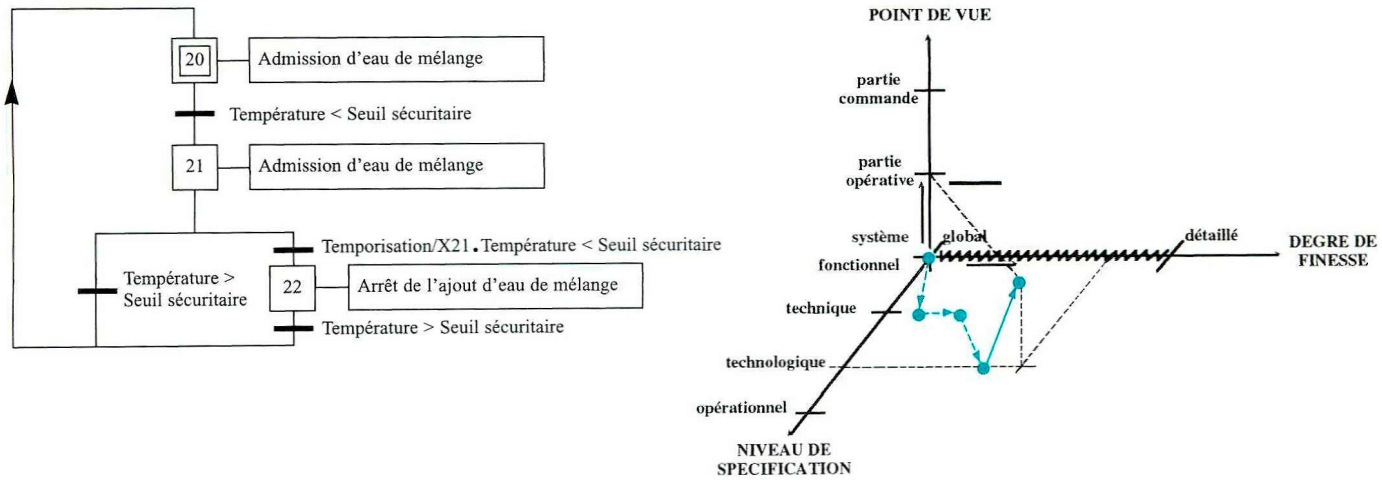


Figure 3-25 : modélisation par Grafcet selon le point de vue « partie opérative »

Le point de vue ***« partie commande »*** peut ainsi être abordé en prenant en compte les éléments de la partie commande. La figure 3-26 en donne le grafcet proche de la programmation « automate ». Toutefois, celui-ci peut encore être modifié ultérieurement selon les contraintes imposées par d'autres facteurs comme dans cet exemple, la prise en compte préventive d'un éventage ; ce dernier point correspond à un niveau de spécification opérationnel comme montré à la figure 3-27.

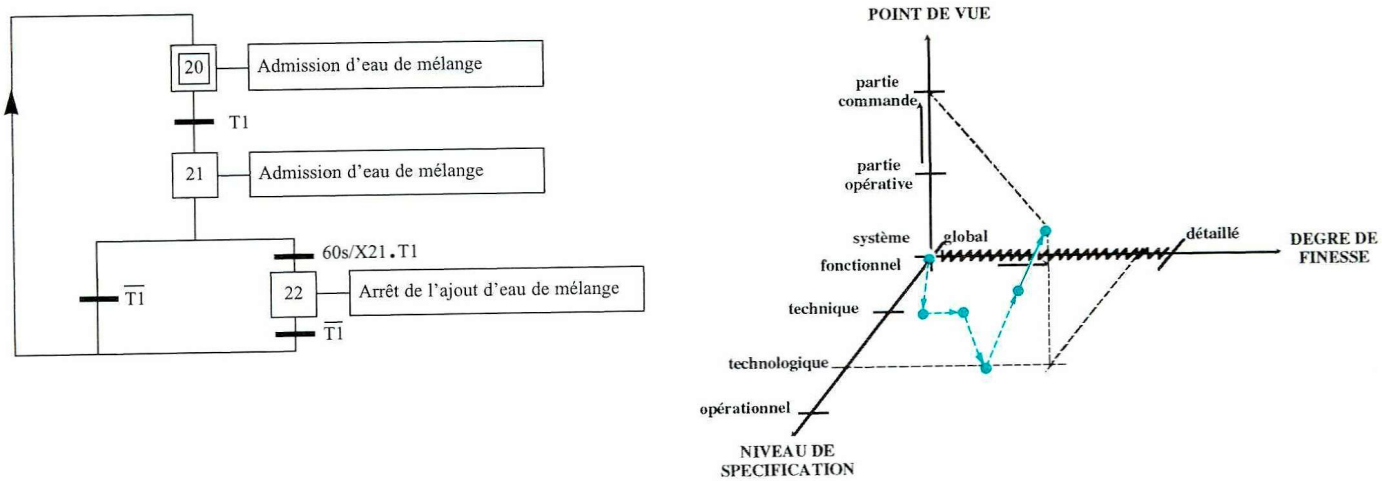


Figure 3-26 : modélisation par Grafcet selon le point de vue « partie commande »

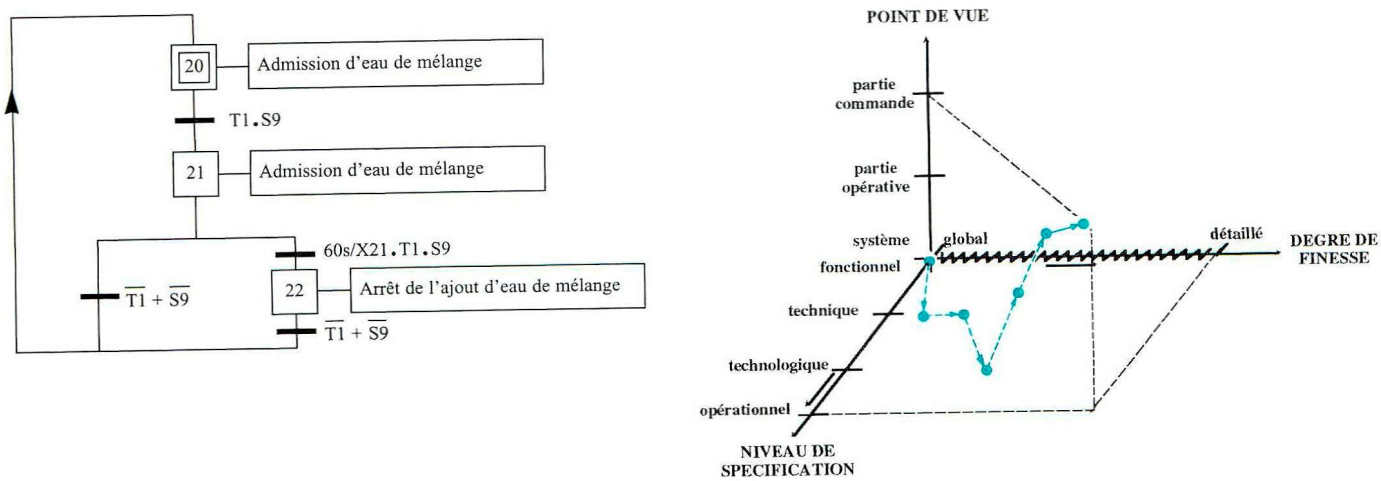


Figure 3-27 : modélisation par Grafcet selon le point de vue « partie commande » prise en compte de spécifications opérationnelles

3.5. Comment se situer lors d'une description par Grafcet ?

Sous un aspect méthodologique, la notion de frontière de description doit être abordée avec rigueur en vue d'éviter toute ambiguïté dans ce qui sera modélisé. Toutefois, elle reste évolutive durant toute la phase de conception.

Nous venons de présenter une approche de modélisation qui y fait référence, prenant en compte les contraintes d'une description par Grafcet et attachée à l'observation partielle du système en vue d'en assurer la description selon un point de vue donné.

Illustrée par 2 exemples repris des applications développées au chapitre 7, elle a permis d'aborder la description Grafcet dès que celle-ci s'est avérée la plus appropriée.

Les contraintes sur les grafcets élaborés y sont étroitement liées à ce qui a été défini comme l'interprétation du Grafcet (comment sont vues les entrées/sorties au niveau de la frontière) avec une interaction vis-à-vis de ce qui a été défini comme la structure du Grafcet.

3.6. Références bibliographiques

[BLA.79] « Comprendre, maîtriser et appliquer le GRAFCET », M. BLANCHARD, CEPADUES Editions, Collection Automatisation et Production, 1979, 174 pages ;

[G7W.92] « Le GRAFCET », Groupe G7W – ADEPA/AFCET, CEPADUES Editions, Collection Automatisation et Production, 1992, 144 pages ;

[GRE.85] « Le GRAFCET : de nouveaux concepts », GREPA, CEPADUES Editions, Collection Automatisation et Production, Décembre 1985, 104 pages ;

[CEI.88] « Etablissement des diagrammes fonctionnels pour systèmes de commande / Preparation of function charts for control systems », Norme Internationale / International Standard, CEI/IEC 848, 1988, 99 pages ;

[NFC.82] « Diagramme fonctionnel GRAFCET pour la description des systèmes logiques de commande », Norme Française NF C03-190, UTE, Juin 1982, 30 pages ;

[ROU.93] « Une algèbre de Boole pour l'approche événementielle des systèmes logiques », J.M. ROUSSEL – J.J. LESAGE, Revue APII, Editions HERMES, Vol.27 N°5, 1993, pages 541 à 560.

[UTE.93] « Établissement des diagrammes fonctionnels pour systèmes de commande – Diagramme fonctionnel GRAFCET. Extension des concepts de base » Documentation de référence (Documentation et symboles graphiques) UTE C03-191, Juin 1993, 35 pages.

CHAPITRE 4

ELEMENTS DE CONSTRUCTION D'UN GRAFCET

CHAPITRE 4
ELEMENTS DE CONSTRUCTION D'UN GRAFCET

Les frontières de description ayant permis de définir les limites de description par Grafcet, ce chapitre aborde l'aspect conception de grafcets au travers de différentes approches complémentaires.

La construction d'un grafcet implique le respect d'un certain nombre de règles de syntaxe (alternance étape-transition, étape d'entrée et étape de sortie d'une expansion de macro-étape, ...) et de dispositions cohérentes (condition de transition source de type événementiel, émission simultanée d'ordres non contradictoires, ...). Cependant, ces seules considérations ne permettent pas de construire des graphes répondant à un cahier des charges précis. Ainsi, la conception d'un grafcet n'est dictée par aucune méthode universellement reconnue ou utilisée.

Les quelques approches de construction développées dans ce chapitre ne sont que des aides ponctuelles. Le concepteur d'un grafcet qui souhaitera utiliser une ou plusieurs de ces approches devra mesurer celles qui lui paraitront les mieux adaptées, et n'hésitera pas à les proscrire si son application rend leur utilisation délicate.

4.1. Problématique de la conception

Comme nous venons de le voir précédemment, la construction d'un grafcet nécessite au préalable la définition d'un cadre d'application qui précise :

- la situation dans le cycle de vie du système (objectif de description),
- le contexte (frontière du système, définition des entrées/sorties, point de vue),
- le niveau de spécifications (fonctionnel, technologique, opérationnel),
- le degré de finesse.

Une fois ces paramètres clairement explicités, la construction du grafcet implique la connaissance des structures de base (linéaire, séquences parallèles, sélection de séquences) et de quelques structures particulières permettant la description de cahiers des charges plus spécifiques (piles FIFO et LIFO, partage de ressource, registre à décalage, ...).

Toute représentation d'un cahier des charges par un grafcet utilisera une ou plusieurs de ces structures, avec cette propriété qu'un même cahier des charges peut être traduit par des grafcets différents, utilisant des structures différentes [BLA.79].

A ce stade se pose le problème de l'évaluation des différentes solutions, évaluation qui devra prendre en compte un certain nombre de critères permettant de faire un choix raisonné au regard de l'utilisation qui sera faite du grafcet (clarté de la description, facilité de programmation, ...).

Dans bien des cas, le concepteur d'une application grafcet se trouve face à une feuille blanche, sans démarche particulière, ne pouvant compter que sur son expérience.

Ce chapitre développe quatre approches méthodologiques permettant d'apporter une aide au concepteur :

- la construction de grafcet par intégration de structures réalisant des fonctions telles que comptage, mémorisation, partage de ressource, ... (voir figure 4-1);
- la construction de grafcet à partir d'une analyse des flux de produits permettant d'avoir une vision produit-procédé (voir figure 4-2);
- la construction de grafcet de synchronisation des tâches par l'étude des antériorités et des postériorités (voir figure 4-3);
- la construction de grafcet de modes de marche et d'arrêt à partir d'une grille GEMMA (voir figure 4-4).

Dans ces approches, il ne s'agit pas à proprement parler de « méthodes », mais de possibilités de constructions rigoureuses de grafcets, offertes par l'utilisation synergique des outils de modélisation.

Cependant, toutes ces techniques de construction nécessitent l'emploi de structures Grafcet génériques ou particulières dont l'élaboration est expliquée, en préalable, dans le paragraphe suivant.

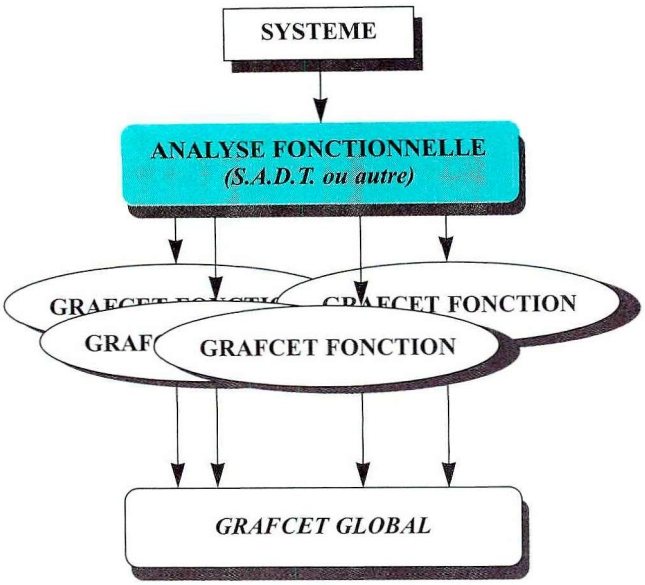


Figure 4-1 : approche par intégration de structures

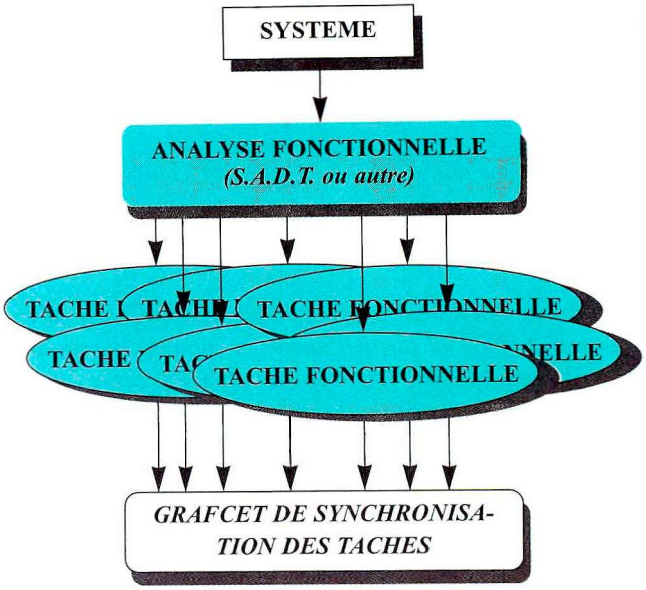


Figure 4-3 : approche par synchronisation des tâches

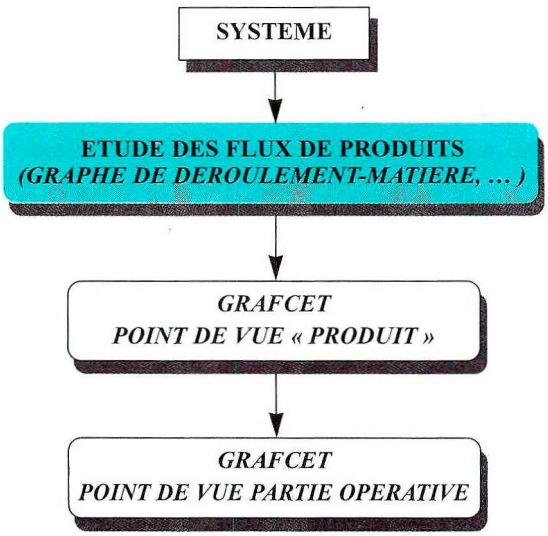


Figure 4-2 : approche selon un point de vue produit

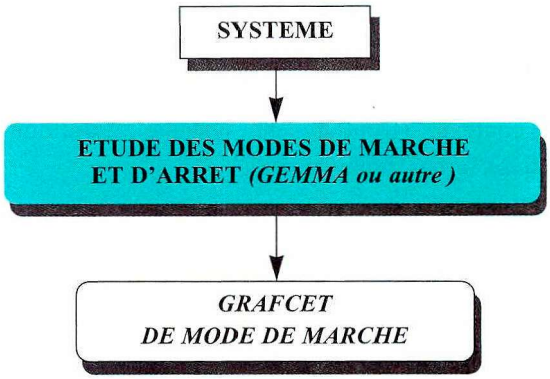


Figure 4-4 : approche selon les modes de marches

4.2. Elaboration de structures Grafcet

4.2.1. Eléments de base de construction d'un grafcet

4.2.1.1. Symbole général d'une étape et d'une transition

Comme l'expose le chapitre 2, les symboles de base sont définis dans la norme CEI 60848. Cependant, on peut remarquer que la désagrégation de structure Grafcet nous donne un symbole plus générique pour l'étape et la transition. Ces deux symboles possédent un certain nombre de points d'entrée et un certain nombre de points de sortie (fig 4-5a et 4-5b), notions déjà abordées par [GRE.85].

L'entrance E caractérise le nombre de points d'entrée et la sortance S le nombre de points de sortie. Par convention d'écriture en Grafcet, les entrées sont placées en haut du symbole et les sorties en bas de celui-ci.

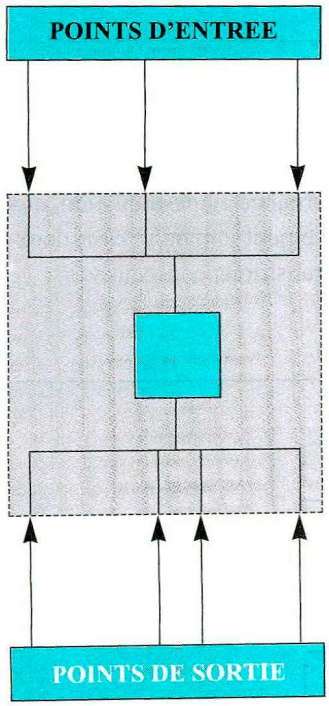


Figure 4-5a : symbole général d'une étape

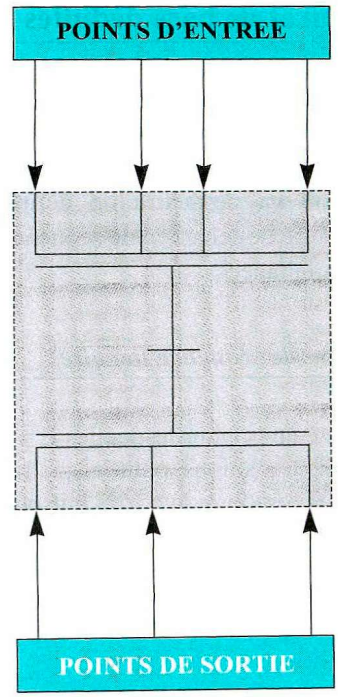


Figure 4-5b : symbole général d'une transition

Plusieurs cas particuliers peuvent être recensés dans des grafcets. Ainsi, dans une séquence « linéaire », l'entrance et la sortance de chaque étape et de chaque transition valent 1, ce qui donne la simplification des symboles comme indiqué dans les figures 4-6a et 4-6b.

Les figures 4-6c et 4-6d indiquent deux autres cas particuliers de représentation, le premier correspondant à une étape puits (étape qui ne possède aucun lien aval) alors que le second représente une transition source (transition qui ne possède aucun lien amont et qui a la propriété d'être toujours validée).

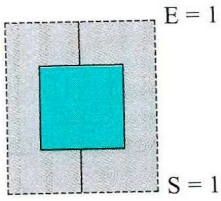


Figure 4-6a : étape

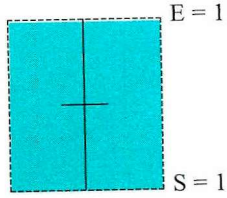


Figure 4-6b : transition

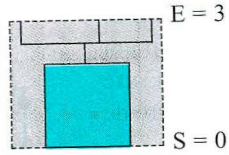


Figure 4-6c : étape puits

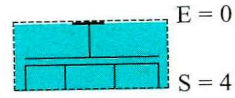


Figure 4-6d : transition source

4.2.1.2. Liaisons orientées

Une liaison relie une étape à une transition ou une transition à une étape. Lorsqu'il n'est pas expressement indiqué, le sens de cette liaison est descendant. Ainsi, la figure 4.7 distingue clairement les deux cas de figure.

Telles qu'elles sont représentées, elles peuvent être directement reliées à des étapes ou à des transitions, par leur point d'entrée ou leur point de sortie.

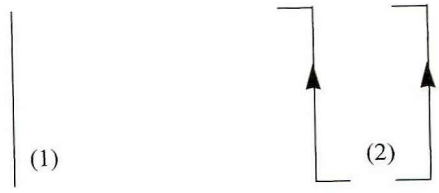


Figure 4-7 : liaisons descendante (1) et ascendantes(2)

4.2.2. Structures de base déduites

L'agrégation ordonnée des éléments de base va donner naissance à des structures bien particulières. Les valeurs de l'entrance E et de la sortance S de chaque étape et de chaque transition va permettre de définir la séquence linéaire, la structure de sélection de séquence et la structure de séquences simultanées.

Remarque : une liaison orientée liant un point de sortie d'une étape à un point d'entrée d'une transition ou un point de sortie d'une transition à un point d'entrée d'une étape, il y a toujours alternance étape-transition, dans toute structure de Grafcet ; il ne peut jamais y avoir deux étapes consécutives, ni deux transitions consécutives.

4.2.2.1. Structure de séquence linéaire

La succession d'étapes, pour lesquelles E = 1 et S = 1 (voir figure 4-6a), et de transitions, pour lesquelles E = 1 et S = 1 (voir figure 4-6b) compose, avec des liaisons orientées descendantes, la séquence linéaire représentée figure 4-8.

C'est la structure la plus simple dans laquelle, au cours du fonctionnement, les étapes s'activent les unes après les autres.

Il est toutefois possible, dans une telle séquence, d'avoir plusieurs étapes actives simultanément dans certains cas particuliers, par exemple dans les structures de piles.

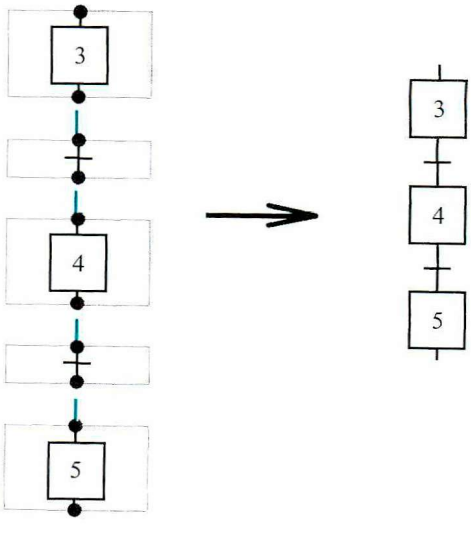


Figure 4-8 : séquence linéaire

4.2.2.2. Structure de sélection de séquences

Lorsqu'une étape possède une sortance S=2, les deux points de sortie vont, par l'intermédiaire de liaisons orientées, se trouver reliés chacun à un point d'entrée de deux transitions distinctes. Cette construction (voir figure 4-9) donne une structure de sélection de séquences.

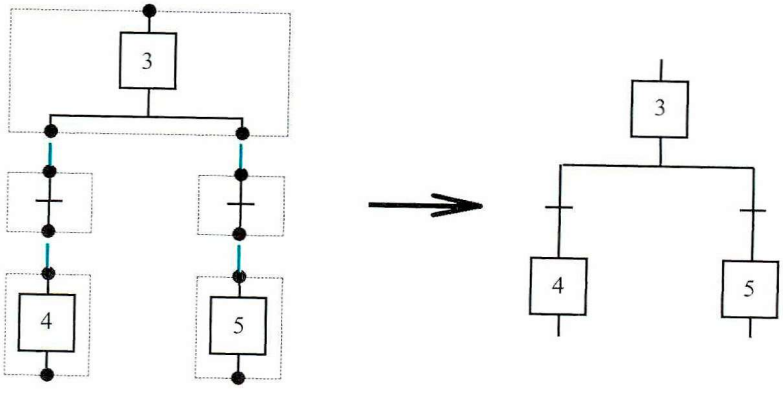
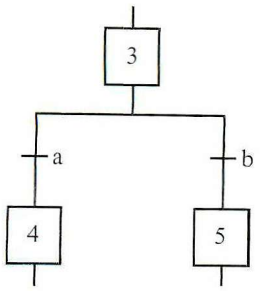


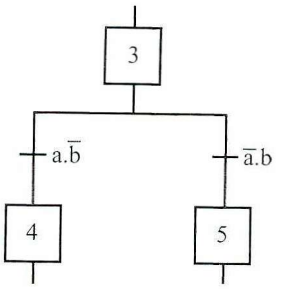
Figure 4-9 : construction d'une structure de sélection de séquences

Le comportement d'une telle structure permet, à partir d'une étape 3 lorsqu'elle est active, de valider les deux transitions auxquelles elle est reliée. Il convient alors d'analyser les réceptivités de ces transitions afin de déterminer laquelle sera franchie et permettra la suite du déroulement. La figure 4-10a montre le danger d'une telle modélisation, car s'il y a bien sélection de séquences dans la structure graphique, l'interprétation des réceptivités peut donner lieu à plusieurs cas de figures : activation de l'étape 4 ou activation de l'étape 5 ou encore activation simultanée des étapes 4 et 5 ce qui ne représente pas fonctionnellement une « sélection ».



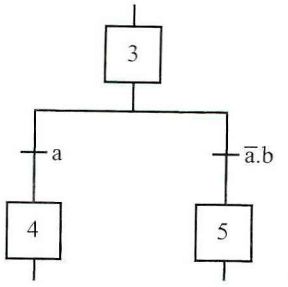
Si les informations a et b sont vraies au moment de l'activation de l'étape 3, les deux étapes 4 et 5 deviennent actives.

Figure 4-10a : parallélisme interprété



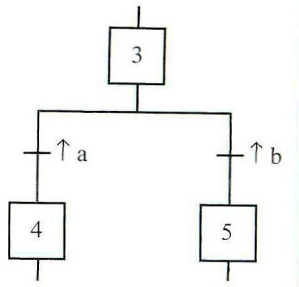
Les réceptivités sont disjointes, il n'y a aucune possibilité de franchissement simultané des deux transitions.

Figure 4-10b : structure exclusive par compléments



Si les variables a et b sont vraies lors de l'activation de l'étape 3, la priorité va conduire à l'activation de l'étape 4.

Figure 4-10c : structure exclusive avec priorité



La simultanéité d'occurence des fronts montants des variables a et b étant impossible, l'exclusivité d'évolution est assurée.

Figure 4-10d : structure exclusive par propriété des fronts

Il est possible de remédier à ce problème en agissant sur les réceptivités. Les figures 4-10b, 4-10c et 4-10d sont trois solutions permettant d'éviter ce franchissement simultané. La disjonction des réceptivités (*fig. 4-10b*) apparaît comme la solution la plus évidente dans ce genre de situation mais elle peut conduire à un blocage à la situation 3 lorsque a et b sont simultanément vraies. Une priorité peut alors être donnée au franchissement d'une des deux transitions, c'est ce qu'envisage la seconde solution (*fig. 4-10c*). La dernière solution (*fig. 4-10d*) utilise des fronts de variable, mais ce dernier cas de figure correspond à un fonctionnement différent puisque le grafcet devient réceptif à un événement (changement d'état de variable), alors que pour les autres, il est sensible à l'état des variables a et b.

• Application 1 : structure de reprise de séquence

La sélection de séquences de la figure 4-11 est produite après l'étape 5 qui possède deux points de sortie. Le fonctionnement observé est alors le suivant : la séquence linéaire, composée des étapes 4 et 5, est exécutée tant que l'information c est fausse. Si c devient vraie, l'autre transition est alors franchie. On peut remarquer que dans ce cas de figure, les deux transitions sont exclusives puisque la réceptivité de l'une est le complément de l'autre.

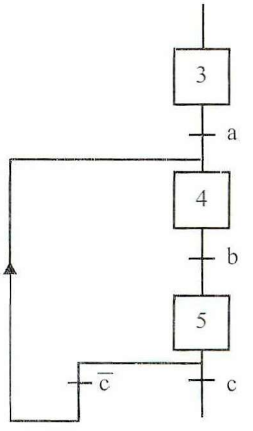


Figure 4-11 : reprise de séquence

• Application 2 : structure de saut de séquence

La sélection de séquences, représentée sur la figure 4-12, a lieu après l'étape 3. Si l'information a est vraie alors que l'étape 3 est active, on produit alors l'activation directe de l'étape 6, sinon la séquence se déroule normalement. Cette structure correspond au saut de la séquence composée des étapes 4 et 5.

On peut faire la même remarque que précédemment en ce qui concerne l'exclusion des deux réceptivités à la sélection des deux séquences.

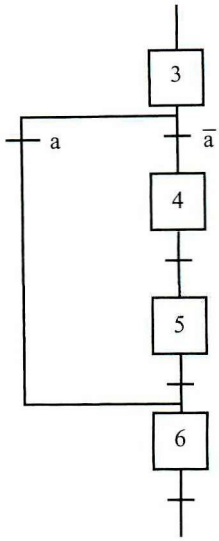


Figure 4-12 : saut de séquence

4.2.2.3. Structure de séquences simultanées

Lorsque la transition (1) de la figure 4-13 possède une sortance S=2, cette transition va se trouver reliée à deux étapes distinctes par deux liaisons orientées.

La structure ainsi établie est appelée structure de séquences simultanées.

Le franchissement de la transition (1) va provoquer l'activation simultanée des étapes 3 et 6, chacune correspondant à la première étape d'une séquence linéaire. Par la suite, chacune des deux séquences 3,4,5 et 6,7,8 va évoluer de manière indépendante.

Selon le cas, les deux séquences linéaires peuvent se trouver synchronisées par une transition finale possédant deux points d'entrée et permettant de relier ces deux séquences.

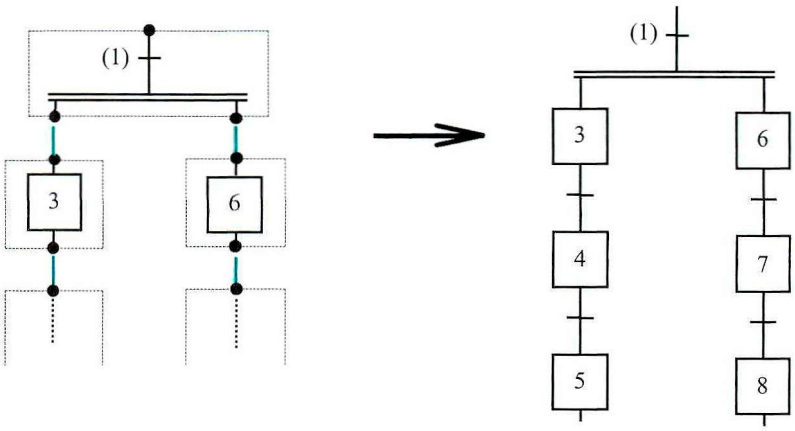


Figure 4-13 : séquences simultanées

4.2.3. Comment détecter des erreurs de syntaxe dans la construction d'une structure ?

Les structures de base sont produites par agrégation ordonnée des éléments de base. Mais, on doit toujours vérifier, dans n'importe quelle structure, la validité de cette syntaxe de construction. Ainsi, le grafcet de la figure 4-14 est obtenu par assemblage des éléments de base « étape » et « transition » reliés les uns aux autres par des liaisons orientées.

La structure « éclatée » de ce grafcet est représentée sur la figure 4-15 dans laquelle les liaisons orientées sont tracées en vert.

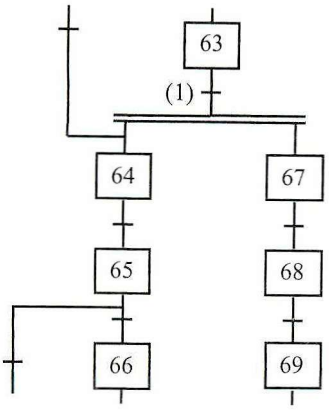


Figure 4-14 : élément de grafcet extrait de la figure 7-14

Ainsi, on peut identifier, pour la transition (1) un point d'entrée (E=1) et deux points de sortie (S=2). De même, pour l'étape 64, on peut y voir E=2 et S=1.

L'intérêt d'une telle décomposition permet effectivement de faire apparaître les erreurs de syntaxe dans la structure séquentielle graphique.

On peut ainsi vérifier que chaque élément (étape ou transition) est bien relié par ses points d'entrée et de sortie à une liaison orientée.

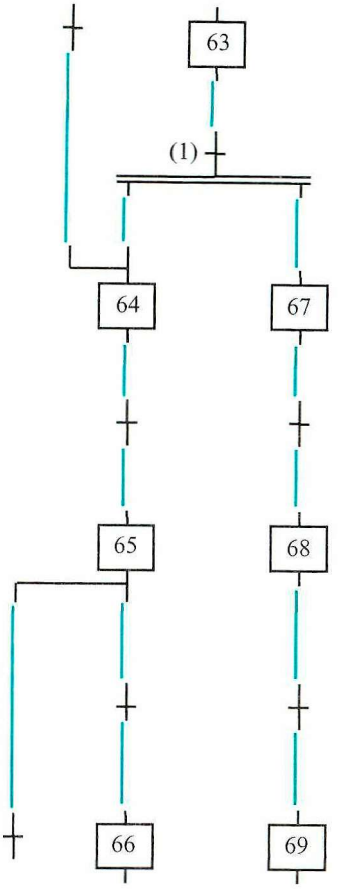


Figure 4-15 : décomposition en éléments de base du grafcet de la figure 4-14

• Contre-exemple de contruction n° 1

La figure 4-16a montre une structure de grafcet incorrecte. En effet, bien qu'il y ait une apparente alternance étape-transition, l'analyse montre que la transition (1) possède deux points d'entrée et un point de sortie alors qu'une liaison orientée vient se connecter sur un point différent comme le montre la figure 4-16b. Sur l'aspect dynamique, une telle structure est erronée car elle conduit à un problème de validation de la transition (1).

Une solution possible à cette erreur est représentée figure figure 4-16c : une transition (2) a été rajoutée en aval de l'étape 23 ; dans ce cas, la transition (1) a toujours deux points d'entrée et un point de sortie, tandis que l'étape 7 comporte alors deux points d'entrée (voir figure 4-16d).

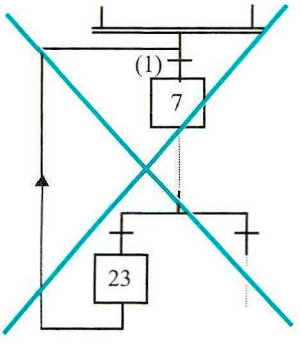


Figure 4-16a : grafcet incorrect

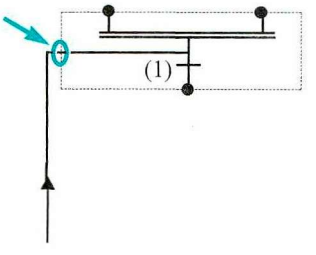


Figure 4-16b : erreur de construction

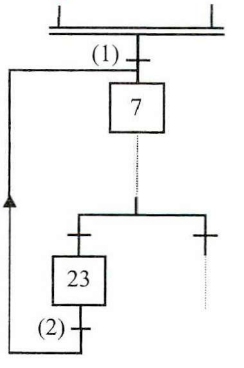


Figure 4-16c : solution possible

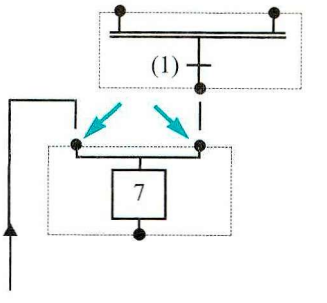


Figure 4-16d : vérification de la syntaxe

• Contre-exemple de contruction n° 2

Une autre erreur de structure est représentée sur la figure 4-17a. Pour les mêmes raisons que précédemment, la liaison orientée se connecte à un endroit où il n'y a ni point d'entrée ni point de sortie de la transition. Les grafcets des figures 4-17b et 4-17c sont deux solutions possibles pour remédier à cette erreur de construction. La première solution prévoit de rajouter l'étape 8 et la transition (2*), alors que la second consiste à modifier la transition (3).

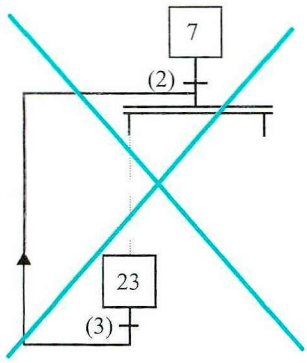


Figure 4-17a : grafcet incorrect

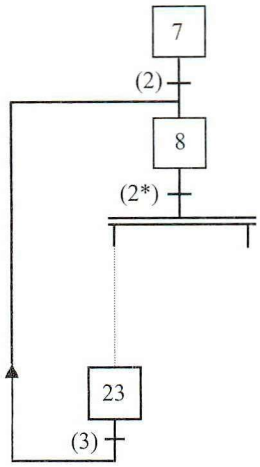


Figure 4-17b : 1e solution possible

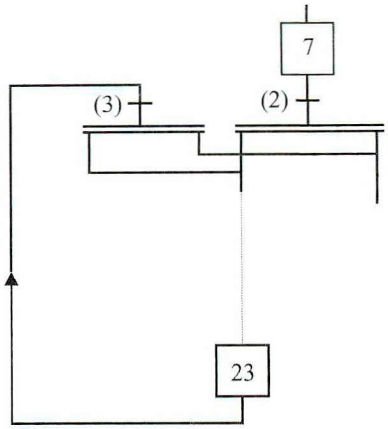


Figure 4-17c : 2e solution possible

4.2.4. Structures génériques décrivant une fonction

L'assemblage des éléments de base ont permis de constituer trois structures de base facilement identifiables. Un assemblage intelligent de ces structures va maintenant servir à la construction d'un grafcet permettant la spécification d'une fonction. Toute application aura ses particularités et la description donnera lieu à des grafcets spécifiques, mais un certain nombre de fonctions seront plus « standard » et pourront faire appel à des structures grafcet plus génériques, telles que la mémorisation, le comptage, le couplage de séquences, le partage d'une ressource, … qui sont développées dans cette partie.

4.2.4.1. Spécification d'une fonction mémoire

Une séquence linéaire à deux étapes et deux transitions, bouclée permet de représenter une fonction mémoire.
Ainsi, dans la figure 4-18, on « mémorise » l'état de la variable c. L'activité de l'étape 10 correspond à c fausse, tandis que l'activité de l'étape 11 correspond à c vraie.

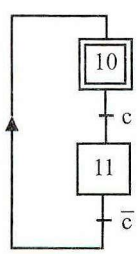


Figure 4-18 : grafcet réalisant une fonction mémoire

• Application : réalisation d'un front de variable

Dans un grafcet, les réceptivités et les actions conditionnelles utilisent des variables, pour lesquelles on s'intéresse à l'état, et des fronts (montants ou descendants) de variables, pour lesquels on s'intéresse au changement d'état (notion d'événement). Dans le grafcet précédent, l'instant où la fonction booléenne « c. X10 » est vraie correspond à l'instant où on observe l'apparition de c.

En effet, si au cours du fonctionnement, X10 est active, cela signifie que la variable c a été mémorisée comme étant fausse ; lorsque c devient vrai et avant que le franchissement n'ait lieu, il existe un temps pendant lequel l'expression « c. X10 » est vraie. Cette fonction, assortie du grafcet de la figure 4-18 est équivalente à ↑ c et peut être utilisée en réceptivité en lieu et place de ce front.

4.2.4.2. Spécification d'une fonction de comptage

La figure 4-19a représente une solution intégrant une variable de comptage C qui sera initialisée à l'étape 0, incrémentée à l'étape 2 puis testée en aval de l'étape 3. La valeur de test du compteur étant de 3, la séquence 1,2,3 est alors reprise deux fois.

Dans le cas de G1, le comptage proprement dit est réalisé par un compteur externe au système décrit à partir du Grafcet (fig 4-19b) [G7W.92].

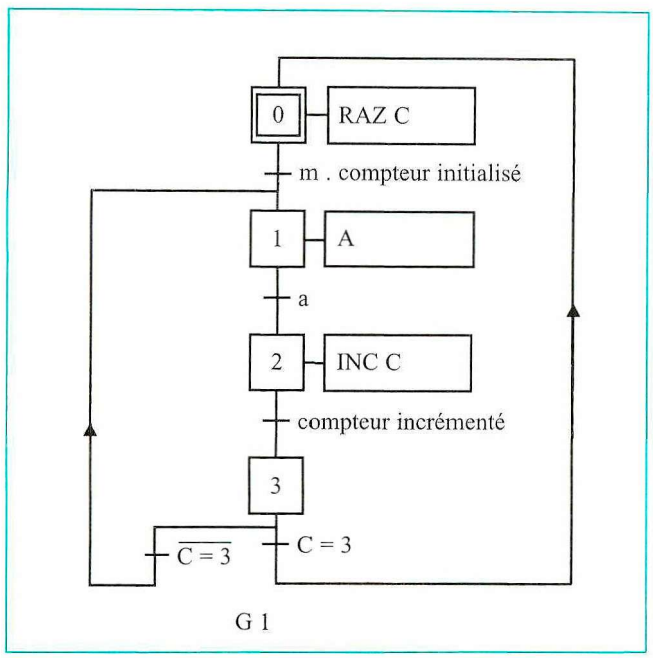


Figure 4-19a : utilisation d'un compteur

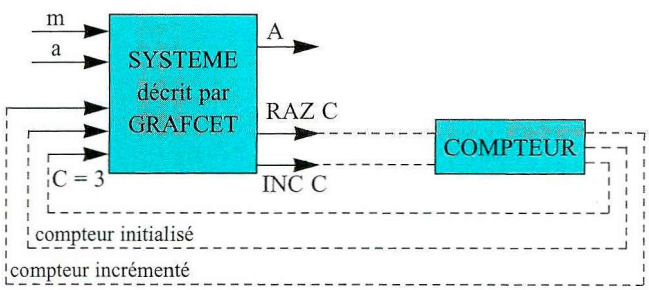


Figure 4-19b : compteur externe à la description Grafcet

Le grafcet de la figure 4-20 est composé de deux grafcets connexes G21 et G22 et remplit la même fonction de comptage que précédemment. La différence réside dans la description du compteur. Celui-ci, entièrement décrit en Grafcet, utilise une séquence linéaire bouclée comportant autant d'étapes (et de transitions) que de valeurs à atteindre pour le compteur. Les variables utilisées dans ce grafcet sont alors des variables internes (états d'étapes).

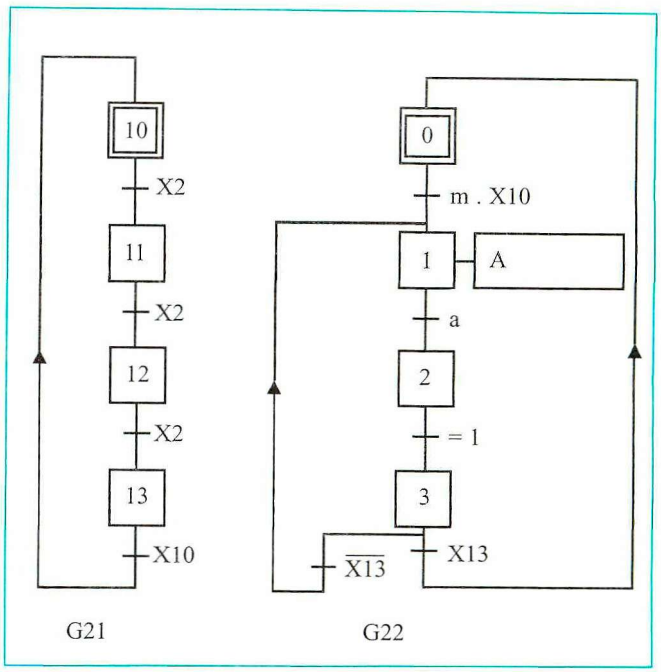


Figure 4-20 : spécification d'un compteur avec un grafcet

La première description nécessite l'utilisation de cinq variables externes : (RAZ C) et (INC C) en sortie du grafcet, (C = 3), (compteur initialisé) et (compteur incrémenté) en entrée du grafcet. Le nombre de variables d'entrée augmente si on a besoin d'un nombre plus important de valeurs du compteur. Les deux variables d'entrée (compteur initialisé) et (compteur incrémenté) sont nécessaires pour renseigner le grafcet sur l'évolution du compteur suite à un ordre de remise à zéro (RAZ C) ou un ordre d'incrémentation (INC C).

La seconde description évite l'utilisation de variables externes, lesquelles sont transcrites en variables internes. Les deux variables d'entrée, vues précédemment, sont maintenant inutiles car la structure et l'évolution du grafcet garantit le bon fonctionnement du comptage. Cependant, cette solution nécessite la description du mécanisme de comptage en Grafcet qui n'est parfois pas simple, en particulier dans le cas où la valeur du compteur représente un nombre important ou dans le cas d'un compteur devant être, en plus, décrémenté.

L'utilisation de l'une ou l'autre structure dépendra de la valeur maximale du compteur, des possibilités de celui-ci (incrémentation, décrémentation, valeur de l'incrément). Mais, d'une manière générale, on peut dire que l'utilisation d'un compteur externe va permettre d'alléger la description Grafcet.

4.2.4.3. Spécification d'une fonction de pile

Une pile peut être réprésentée par deux structures différentes qui résultent d'une combinaison plus complexe des éléments de base.

Dans la structure d'accumulation (figure 4-21), les étapes 2, 3, 4, 5 sont activées successivement par les franchissements de la transition (1), puis désactivées simultanément par le franchissement de la transition (2). Chaque occurrence de « empiler » conduit au remplissage graduel de l'accumulateur et l'apparition de « vider » vide cet accumulateur, une fois celui-ci rempli.

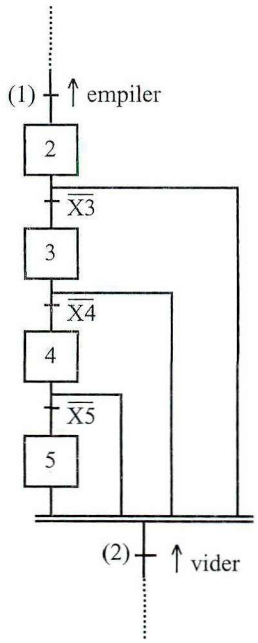


Figure 4-21 : structure d'accumulation

Dans la structure de réservoir (figure 4-22), les étapes 2, 3, 4, 5 sont activées simultanément par le franchissement de la transition (3) puis désactivées successivement à chaque franchissement de la transition (4). L'apparition de « remplir » remplit complètement le réservoir, tandis que l'occurrence de « dépiler » permet de vider graduellement ce dernier.

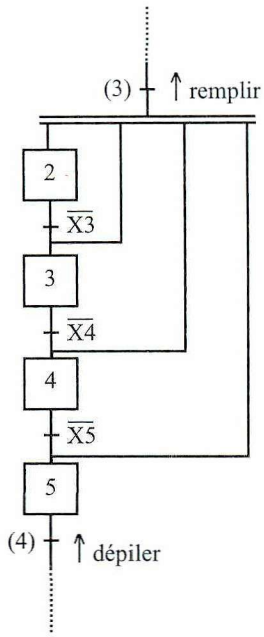


Figure 4-22 : structure de réservoir

Ces deux structures peuvent également représenter l'état d'un compteur, mais ces descriptions restent plus intéressantes pour la représentation de piles.

4.2.4.4. Spécification d'une fonction de file d'attente

Une file d'attente peut être représentée par un grafcet linéaire (voir figure 4-23) dont le fonctionnement correspond au principe du registre à décalage. La file d'attente est représentée par 3 places (les 3 étapes du grafcet). Si « file ouverte » est vraie, l'occurrence de « décaler » produit l'apparition d'une marque (activation de l'étape 1) par le franchissement de la transition source. Cette marque avance pas-à-pas à chaque nouvelle occurrence de « décaler », jusqu'à ce qu'elle disparaisse lors du franchissement de la transition puits. Si « file ouverte » est vraie au cours de ces évolutions, plusieurs marques se déplacent simultanément dans ce grafcet.

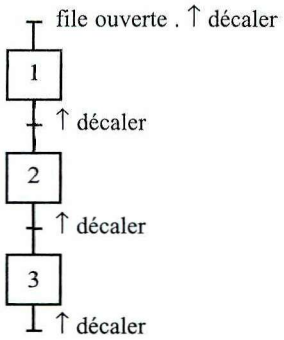


Figure 4-23 : structure de registre à décalage

4.2.4.5. Spécification d'un couplage de séquences

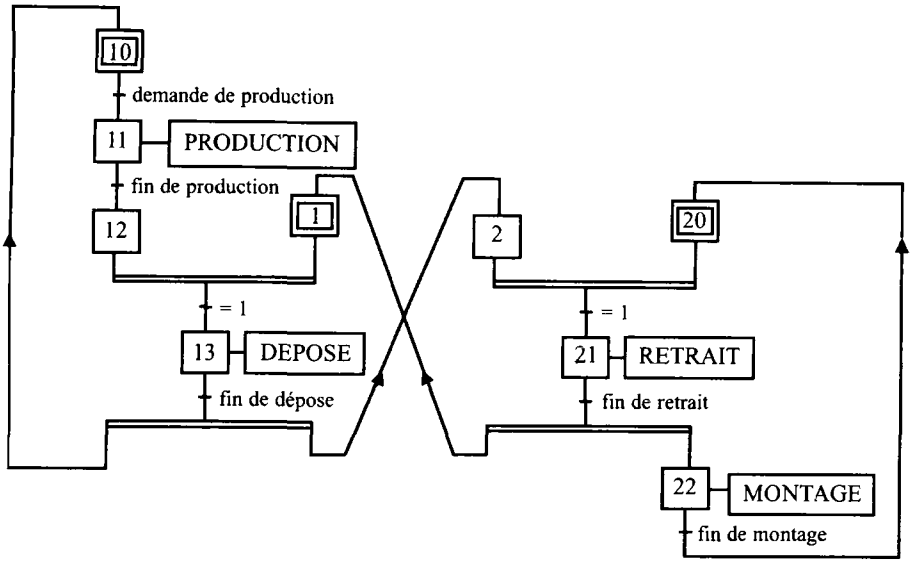


Figure 4-24 : exemple de couplage de deux séquences

Ce type de structure permet, entre autres, de représenter le déroulement alterné de deux séquences. Elle résulte de la combinaison de séquences linéaires et de séquences simultanées.

Le grafcet de la figure 4-24 représente la gestion d'une aire de stockage commune à un poste de PRODUCTION et à un poste de MONTAGE.

Les opérations de retrait et de dépose sont réalisées alternativement. Les étapes 1 et 2 constituent des étapes de synchronisation qui permettent l'alternative d'exécution des opérations de DEPOSE et de RETRAIT.

4.2.4.6. Spécification du partage d'une ressource

L'assemblage des trois structures de base permet de réaliser un partage de ressource logique ou physique (exemple : un robot d'alimentation desservant plusieurs postes de travail).

Dans le grafcet de la figure 4-25, la disponibilité de cette ressource est matérialisée par l'étape 100, dont l'activité va permettre le franchissement d'une des transitions (1), (2) ou (3).

La ressource commune doit être partagée entre plusieurs séquences utilisatrices exclusives. L'exclusion est traduite dans les réceptivités des transitions (1), (2) et (3), qui intègre une gestion de priorités.

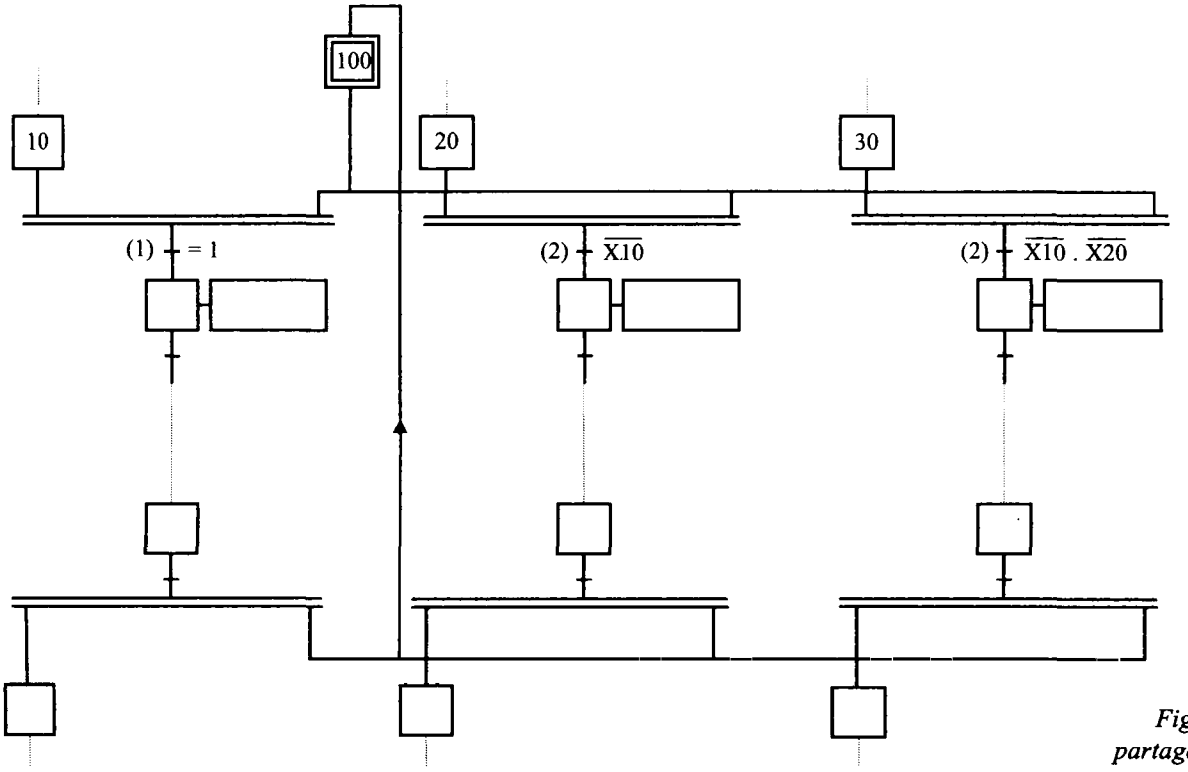


Figure 4-25 : partage de ressource

4.3. Différentes approches pour la construction de grafcets

Les différentes techniques d'assemblage d'éléments de base ou de structures de base qui vont servir à l'élaboration de grafcets vont être dictées par les quatre approches que nous abordons dans ce paragraphe.

Toutes ces approches utilisent un outil de spécification amont. Deux d'entre-elles s'appuient sur une spécification fonctionnelle, une autre sur une spécification des flux, enfin une dernière sur une analyse des modes de marche.

4.3.1. Construction de grafcet par intégration de structures

Cette première approche part du principe qu'il est possible d'identifier des fonctions élémentaires du système isolé et qu'il existe une base de grafcets génériques capables de décrire le comportement interne de ces fonctions.

Une spécification fonctionnelle détaillée est nécessaire pour l'identification de ces fonctions élémentaires. Un outil tel que SADT [IGL.89] peut répondre à ce besoin.

La base de données va comporter un certain nombre de grafcets génériques répondant à des fonctions dont certaines ont été évoquées dans le paragraphe précédent (mémorisation, comptage, gestion de pile, partage de ressources, ...) mais aussi d'autres fonctions spécifiques.

L'application développée dans ce paragraphe prend appui sur le modèle SADT décrit dans la première partie du chapitre 7 (machine à assembler les connecteurs). Il considère la description du fonctionnement d'une partie du poste N°4 qui correspond à l'évacuation du connecteur assemblé.

Les descriptions suivantes correspondent à différentes structures répondant au cahier des charges, à savoir la dépose de connecteurs à plusieurs emplacements différents.

La présentation qui est faite commence par la structure la plus simple pour finir par la plus élaborée. Les particularités de chacune, et les évolutions de structure sont expliquées au fur et à mesure, mais rien ne permet de préciser formellement la technique de construction.

Le sous-système décrit (voir figure 4-26) a conduit à considérer un cycle complet d'approvisionnement pour une rangée de palette.

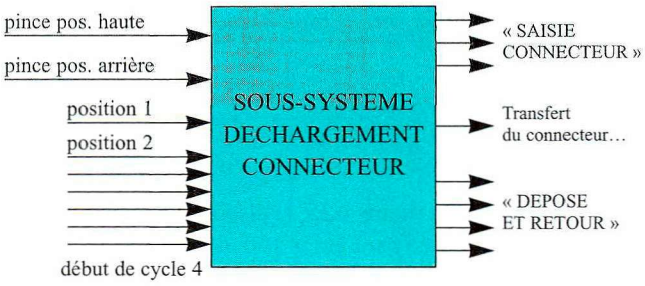


Figure 4-26 : définition des entrées-sorties

Cette définition des entrées-sorties est identique pour les solutions 1, 2, 3, 4 et 5 qui vont suivre.

4.3.1.1. Première description : structure linéaire monolithique

Le grafcet de la figure 4-27 utilise une structure linéaire décrivant la dépose successive dans le casier n° 1, puis dans la casier n° 2, ..., chaque cycle de dépose étant ordonné par l'information « début de cycle 4 » et chaque fin d'exécution étant renseigné par « début de cycle 4 ».

Remarque : Afin d'alléger la description, le grafcet présenté comporte des macros-étapes.

Cette description est la plus simple puisqu'elle montre l'enchaînement complet de toute la séquence de chargement d'une rangée de palettes. Cependant, elle est très longue et oblige à représenter six fois la même séquence de « SAISIE CONNECTEUR » puis Transfert du connecteur puis « DEPOSE ET RETOUR ».

En effet, on peut dénombrer 30 étapes ou macro-étapes dans ce graphe.

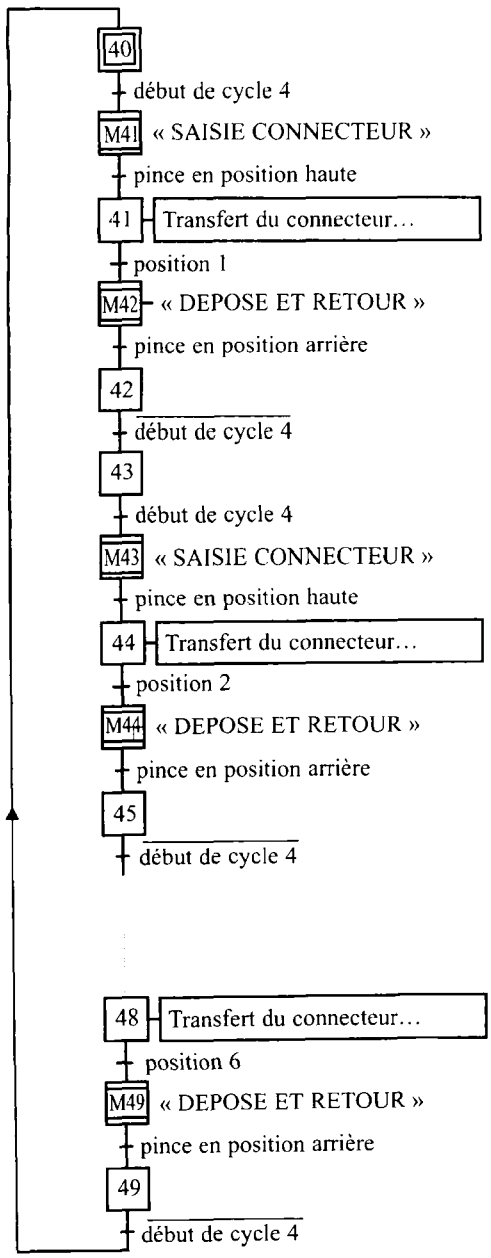


Figure 4-27 : grafcet de la solution 1

4.3.1.2. Seconde description : utilisation de la notion de séquence réutilisable

La structure de la figure 4-28 exploite la notion de séquence réutilisable et permet ainsi un grafcet moins long que le précédent puisqu'il n'y a plus répétition graphique de la même séquence. Cette notion est homogène au sous-programme informatique.

Un graphe (G1) assure la gestion de la dépose et le sous-programme (G2) l'exécution de cette dépose.

Les conditions de lancement et de fin d'exécution de la fonction sont identiques à la solution précédente.

Cependant, (G1) exploite le même principe d'enchaînement des cycles que le grafcet de la figure 4-27.

Le nombre cumulé d'étapes et de macro-étapes n'est plus que de 17 pour l'ensemble des deux graphes.

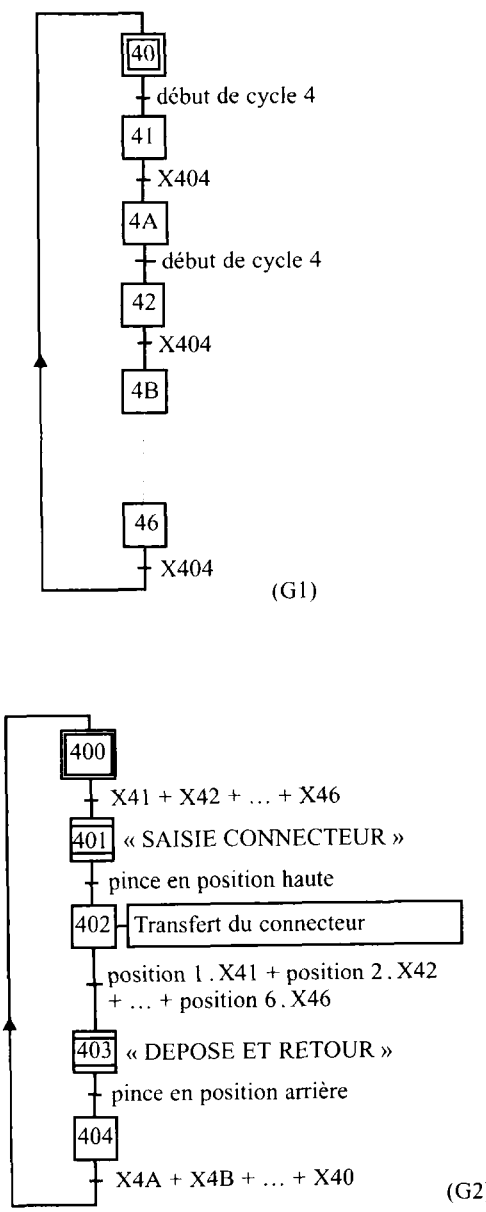


Figure 4-28 : grafcet de la solution 2 utilisant la notion de séquence réutilisable

Ces deux premières solutions peuvent être nettement améliorées par l'utilisation d'une fonction de comptage, telles que les considèrent les solutions 5 et 6 qui suivent.

4.3.1.3. Troisième description : utilisation de la structure de pile

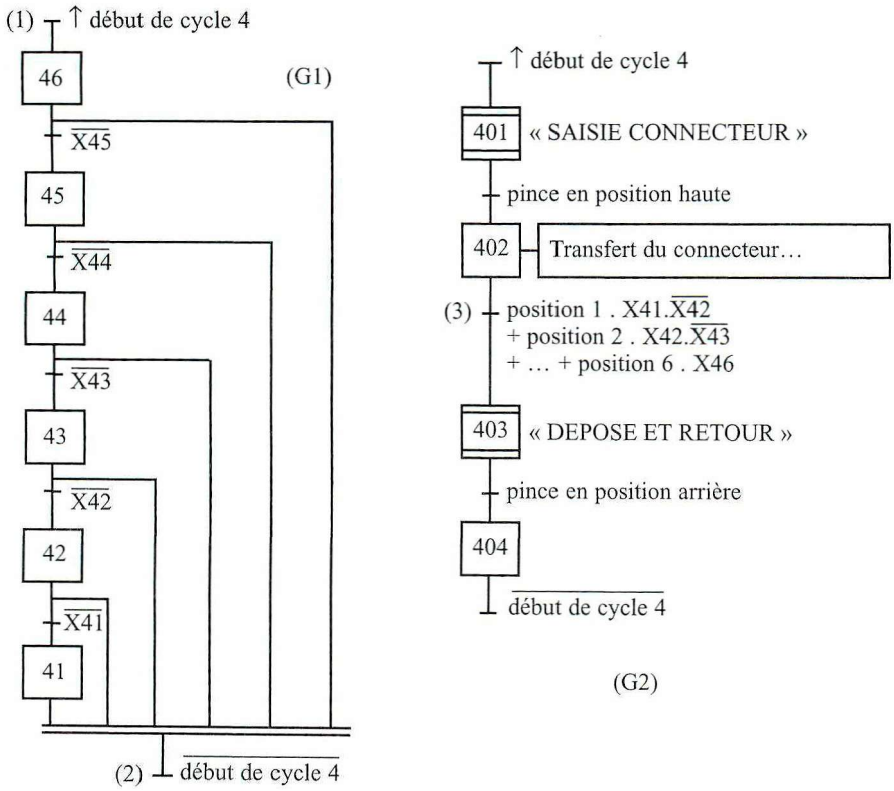


Figure 4-29 : solution 3 avec structure de pile

La figure 4-29 montre une solution qui intègre une structure de pile de type accumulateur où les étapes 41 à 46 s'activent successivement à chaque franchissement de la transition (1). Ce graphe est image de l'état des casiers dans la rangée en cours de remplissage. Consécutivement au début de cycle 4, la dernière étape activée du graphe (G1) va indiquer l'emplacement dans lequel il faudra déposer le connecteur, information traduite dans la réceptivité de la transition (3). Lorsque tous les casiers sont occupés, cela signifie que la rangée est pleine et qu'il faudra réitérer cette image pour une nouvelle rangée. Par conséquent, l'achèvement du cycle va produire le franchissement de la transition (2) qui désactive les étapes 41 à 46.

4.3.1.4. Quatrième description : utilisation de la structure de file d'attente

La structure de file d'attente permet de représenter l'endroit où le connecteur doit être déposé. Le grafcet de la figure 4-30 illustre cette solution.

Lorsqu'une rangée vide se présente en face du manipulateur, toutes les étapes du graphe G1 sont inactives.

A l'apparition du premier début de cycle 4, la réceptivité de la transition (1) est vraie, ce qui permet l'activation de l'étape 41. Le manipulateur dépose alors le premier connecteur dans le premier casier. L'information lui est transmise par la réceptivité de la transition (3).

A l'apparition du second début de cycle 4, l'étape 41 est désactivée et l'étape 42 est activée. Cela indique au manipulateur qu'il doit déposer le second connecteur dans le casier suivant. Cette indication se répète pour les autres casiers jusqu'à ce que la rangée soit pleine; alors l'information $\overline{\text{début de cycle 4}}$ dans la réceptivité de la transition (2) désactive ce grafcet.

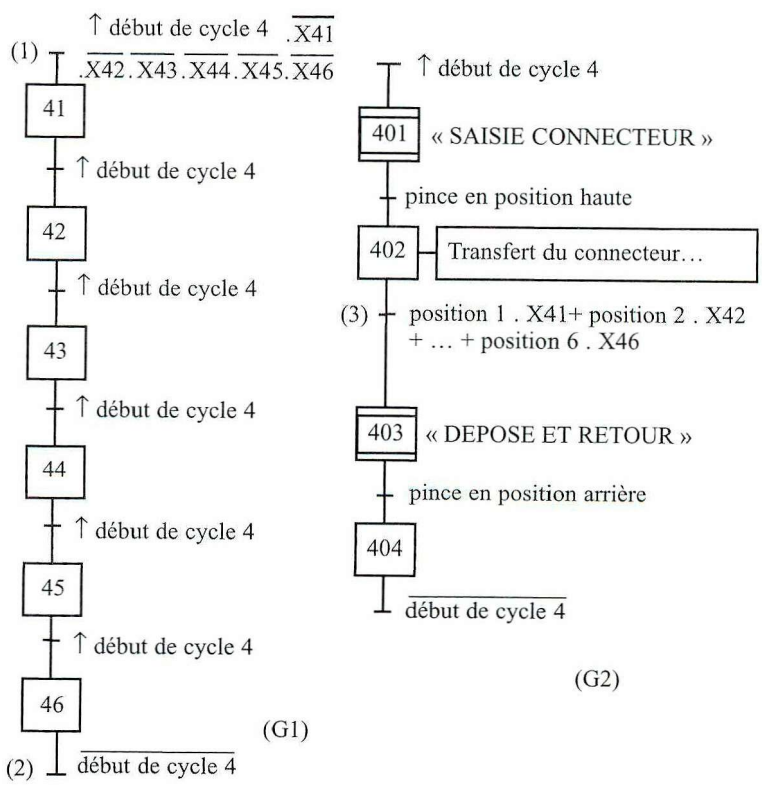


Figure 4-30 : solution 4 avec structure de file d'attente

4.3.1.5. Cinquième description : utilisation d'un compteur décrit en Grafcet

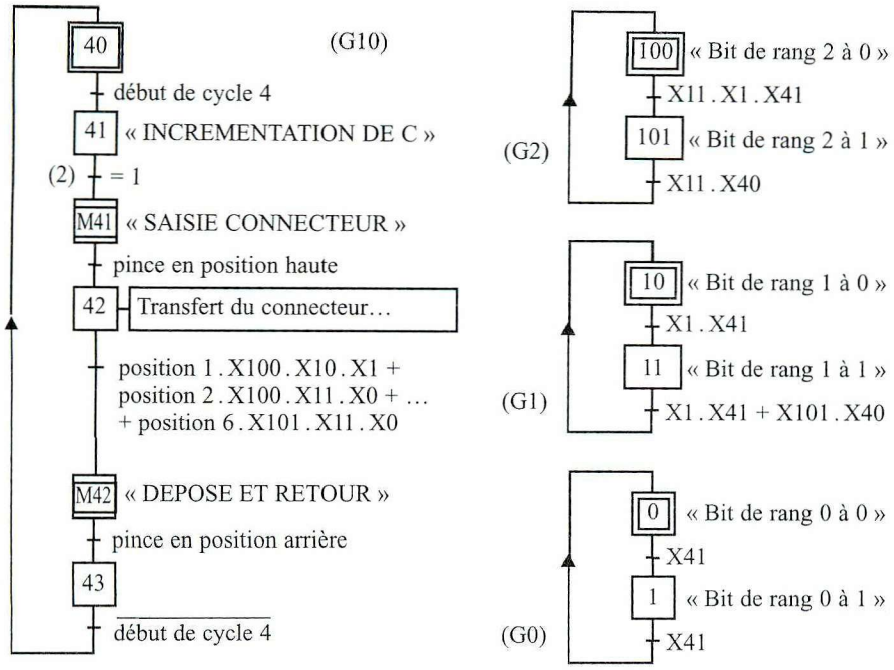


Figure 4-31 : solution 5 utilisant un compteur décrit en Grafcet

Un compteur, décrit en Grafcet, est utilisé pour cette cinquième solution (voir figure 4-31). Ce compteur binaire doit exprimer des valeurs de 1 à 6. Sa valeur est codée avec un nombre binaire de trois bits, dont la représentation est faite par trois grafcets de deux étapes.

Avant chaque prise de pièce, décrite par (G10), l'activation de l'étape 41 va permettre un franchissement et un seul de transitions appartenant aux graphes (G0), (G1), (G2), en raison de la réceptivité associée à la transition (2). En effet, lorsque l'étape (41) est activée, cette transition (2) devient franchissable et elle est franchie simultanément avec les transitions des autres graphes, en raison de l'application de la règle d'évolution 4.

4.3.1.6. Sixième description : utilisation d'un compteur externe à la description Grafcet

Cette solution correspond au grafcet de la figure 7-10. La description considère le compteur externe, comme cela est exprimé sur les figures 4-19a et 4-19b.

Cette description intègre une structure grafcet spécifique correspondant à l'exécution de la dépose par le manipulateur et à l'avance de la palette et deux structures génériques exécutant le comptage de casier et le comptage de rangée (voir figure 4-32).

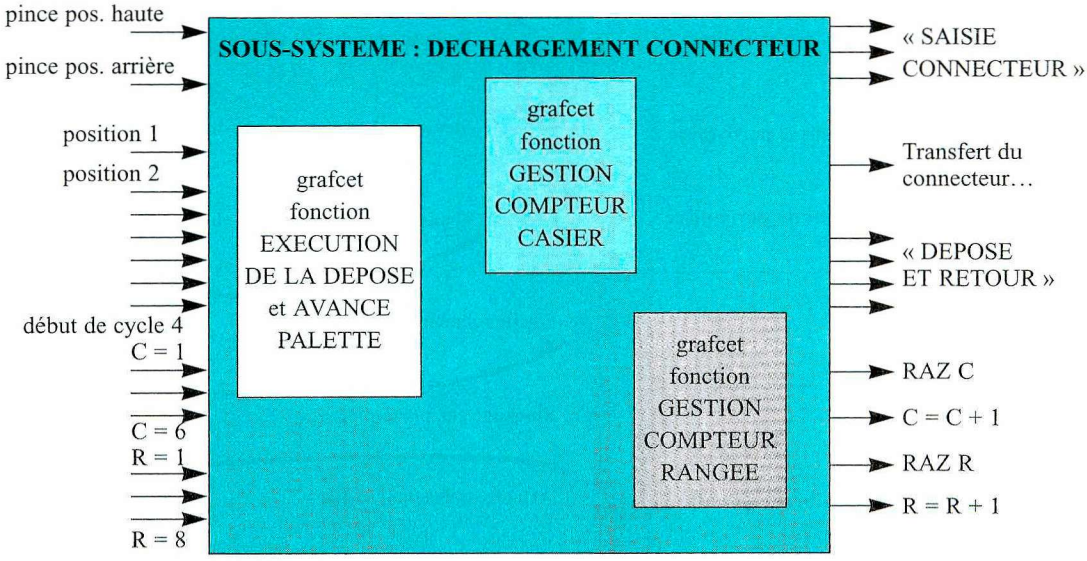


Figure 4-32 : modèle de la description effectuée par Grafcet en figure 7-10

4.3.2. Construction d'un grafcet à partir d'une analyse des flux de produits

La démarche proposée ici consiste à utiliser un diagramme de flux de produits [ANS.79] qui représente les mouvements des pièces dans la partie opérative du système. A partir de cette analyse, on peut alors modéliser la commande nécessaire à l'animation de cette partie opérative, à l'aide d'un grafcet. Cette approche favorise une vision du système de type produit-procédé [GEN.92].

La première étape consiste à isoler les activités internes au sous-sytème décrit des activités qui lui sont externes. En second lieu, aux activités internes seront associées des étapes (ou macro-étapes) Grafcet avec certaines règles de correspondance. Ainsi, aux activités d'« opération », de « contrôle », de « transfert » vont correspondre des étapes auxquelles seront associées des actions nécessaires au déroulement de l'activité. L'« attente » qui exprime une synchronisation est également associée à une étape, mais qui ne comporte aucune action, alors que le « stockage » ne correspond à aucun état caractéristique en Grafcet. Il est possible, pour les autres activités comportant des symboles composés, de définir également une correspondance. Les figures 4-33a et 4-33b illustrent cette approche, en utilisant l'application N°1, développée dans le chapitre 7.

On peut noter que ce principe est proche du registre à décalage, vu précédemment, lequel permet de représenter un flux de produit, homogène avec cette description.

La partie grisée concerne le flux de pièces « boîtier » et la partie sur fond vert concerne ce flux de pièces « boîtier » au cours de son traitement au poste 2.

Une autre possibilité offerte par cette procédure est de produire un grafcet de coordination, en relation avec la synchronisation des flux de produits.

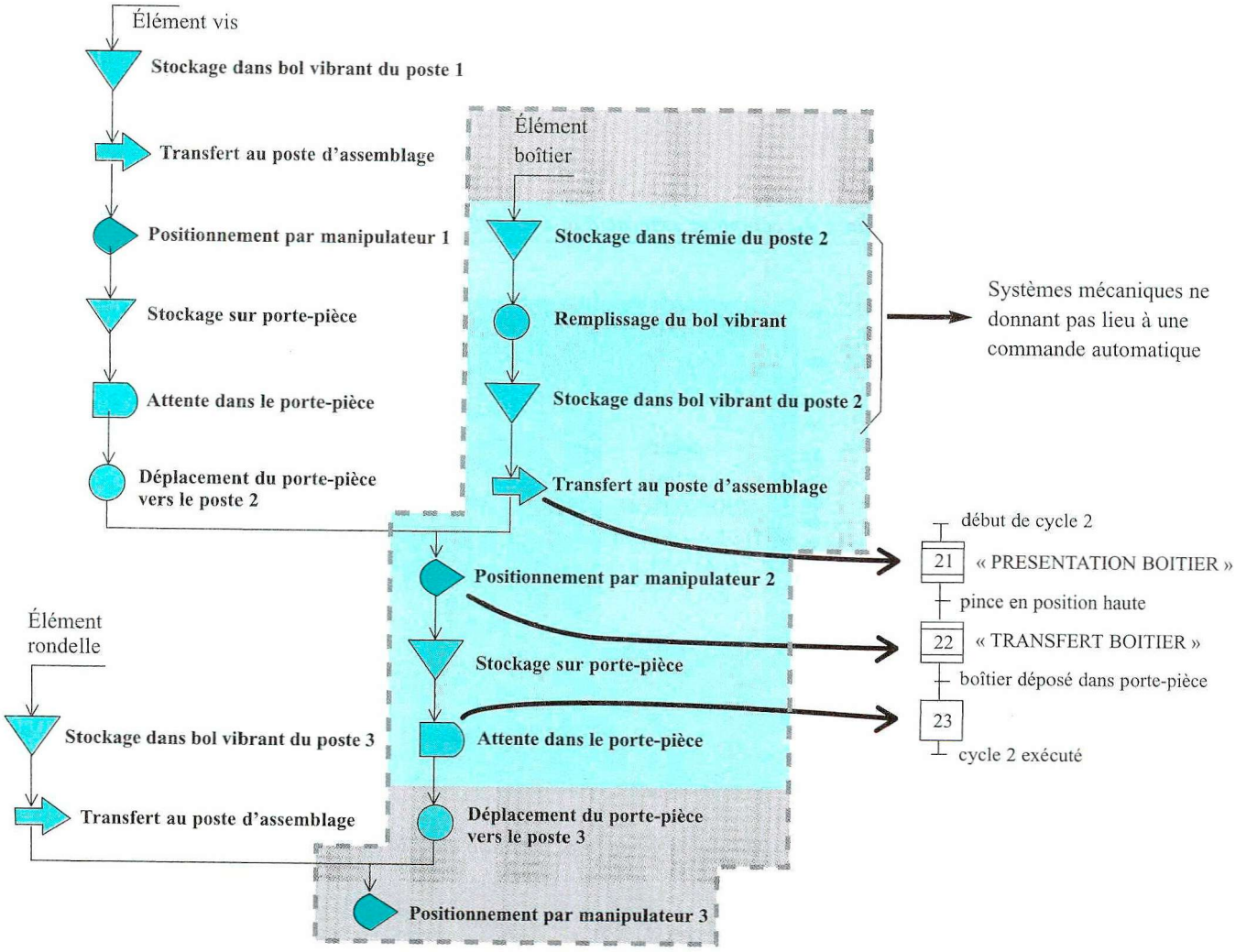


Figure 4-33a : extrait du « process charts » de la machine à assembler les connecteurs

Figure 4-33b : élément de grafcet correspondant

4.3.3. Construction de grafcet de synchronisation des tâches

Bien que le Grafcet soit un outil de spécification, il s'attache essentiellement à représenter le comportement dynamique du système. Un outil tel que SADT [IGL.89] se révèle plus performant lorsqu'il s'agit de faire une spécification fonctionnelle dans le but de structurer l'application, en particulier, lorsque l'on doit faire une partition du système en plusieurs sous-systèmes.

Chaque sous-système répond à une fonction particulière dont le comportement dynamique peut alors être spécifié par Grafcet. Cette partie montre, sur la machine à assembler les connecteurs, en quoi l'utilisation d'un modèle SADT (présenté dans le chapitre 7.1.) peut efficacement servir à la construction d'un grafcet.

4.3.3.1. Partition des tâches fonctionnelles

L'analyse fonctionnelle SADT permet de mettre en évidence un certain nombre de fonctions définies par actigrammes. L'outil de description de chacune des fonctions dépend de sa nature. Ainsi :

- s'il s'agit d'une fonction combinatoire, elle peut être décrite, entre autres, à l'aide d'une équation booléenne, ou un schéma à relais, ou une table de vérité ;
- s'il s'agit d'une fonction de régulation, elle peut être décrite, par exemple, avec une fonction de transfert ou avec un schéma bloc fonctionnel ;
- s'il s'agit d'une fonction séquentielle, elle peut être décrite en Grafcet, en réseau de Petri, ou ...
- ...

Par ailleurs, il est également nécessaire de décrire le fonctionnement global du système complet. Sa nature séquentielle, dans notre exemple, nous oriente vers une représentation en Grafcet, qui permet alors de représenter l'aspect comportemental.

Les tâches fonctionnelles sont identifiées à partir des activités du modèle SADT (figure 4-34).

ACTIVITES (SADT)		MECANISME-SUPPORT (SADT)
TACHES FONCTIONNELLES	**N°**	**SOUS-PARTIE OPERATIVE**
Approvisionner les composants	*T0*	*BOLS VIBRANTS*
Assembler les vis	*T1*	*POSTE 1*
Assembler les boîtiers	*T2*	*POSTE 2*
Assembler les rondelles	*T3*	*POSTE 3*
Charger les palettes	*T4*	*POSTE 4*
Transférer les sous-ensembles	*T5*	*POSTE 5 (plateau tournant)*
Approvisionner en palettes	*T6*	*POSTE 6 (descenceur)*
Evacuer les palettes	*T7*	*POSTE 7 (ascenceur)*

Figure 4-34 : identification des tâches fonctionnelles

4.3.3.2. Définition des entrées/sorties du sous-système à synchroniser

A ce stade, il convient de distinguer les tâches nécessitant des synchronisations de celles mises en œuvre de façon permanente ou réalisées indépendamment, ou encore gérées par un opérateur.

Dans le cas de la machine de conditionnement, l'approvisionnement des composants est réalisé à partir de bols vibrants en mouvement continu. Par conséquent, leur fonctionnement est autonome et n'a pas lieu d'être synchronisé avec une autre tâche fonctionnelle.

On peut donc définir les entrées/sorties sur la figure 4-35.

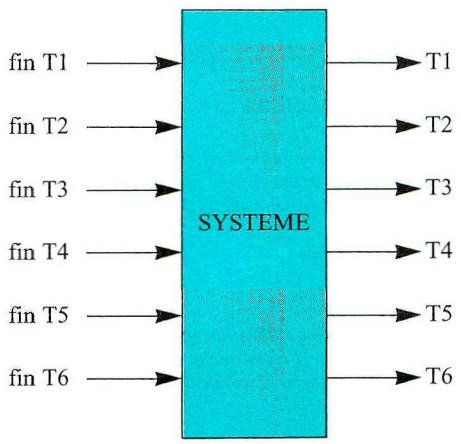


Figure 4-35 : entrées-sorties du sous-système

.3.3. Recherche des antériorités et des postériorités

s'agit de décrire les règles transitionnelles de début et de des tâches Ti ; les premières correspondent aux condi-ns d'activation de la tâche Ti, alors que les secondes tra-isent les autorisations de lancement de tâches données r la fin d'exécution de la tâche Ti. Ces dernières sont éga-nent les conditions de désactivation de la tâche Ti IER.86].

Le tableau de la figure 4-36 fait la synthèse des antériorités et des postériorités pour chacune des tâches fonctionnelles. D'autres informations telles que « nouvelle palette » et « palette pleine » complètent les conditions précédentes.

CONDITIONS DE LANCEMENT DE LA TACHE Ti (conditions suffisantes)	TACHE FONCT. Ti	FIN DE TACHE Ti AUTORISE (conditions nécessaires)
fin de T5	T1	T5
fin de T5	T2	T5
fin de T5	T3	T5
(fin de T5 et fin de T6) si nouvelle palette ou (fin de T5) si $\overline{\text{nouvelle palette}}$	T4	T5 ou T5 et T6 si palette pleine
fin de T1 et fin de T2 et fin de T3 et fin de T4	T5	T1, T2, T3, T4
fin de T4 et palette pleine	T6	T4

Figure 4-36 : tableau des antériorités

.3.4. Elaboration d'éléments de graphe associés à chaque tâche fonctionnelle

transcription en Grafcet se fait de la manière suivante : haque tâche fonctionnelle, il est possible d'associer un phe dont l'exécution sera produite à partir d'une étape ppel ou une expansion de macro-étape.

'agit à ce stade de figurer les contraintes d'antériorité et postériorité relatives à chacune des tâches sur un élé-nt de graphe (voir figures 4-37a et 4-37b).

condition de lancement de la tâche Ti, exprimée par la de tâche Tj, est représentée par une étape portant le néro ji, ou encore peut être précisée dans la réceptivité.

L'état de fin d'exécution de la tâche Ti autorisant la tâche Tk va être représenté par une étape portant le numéro ik.

Prenons l'exemple de la tâche T1 : l'activité de l'étape 51 du graphe « TACHE 1 » exprime que la tâche 5 ***doit être*** ter-minée pour pemettre l'exécution de T1 ; dans le graphe « TACHE 5 », l'activité de l'étape 51 indique que la tâche T5 ***est*** terminée ; ces deux étapes, qui portent alors le même numéro, expriment le même état et peuvent donc fusionner.

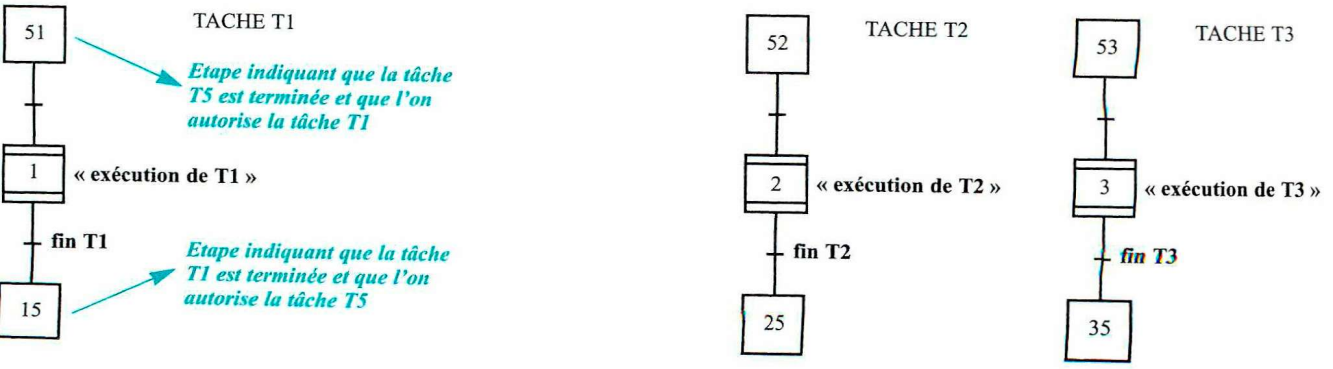


Figure 4-37a : éléments de graphe traduisant les antériorités des tâches fonctionnelles T1, T2 et T3

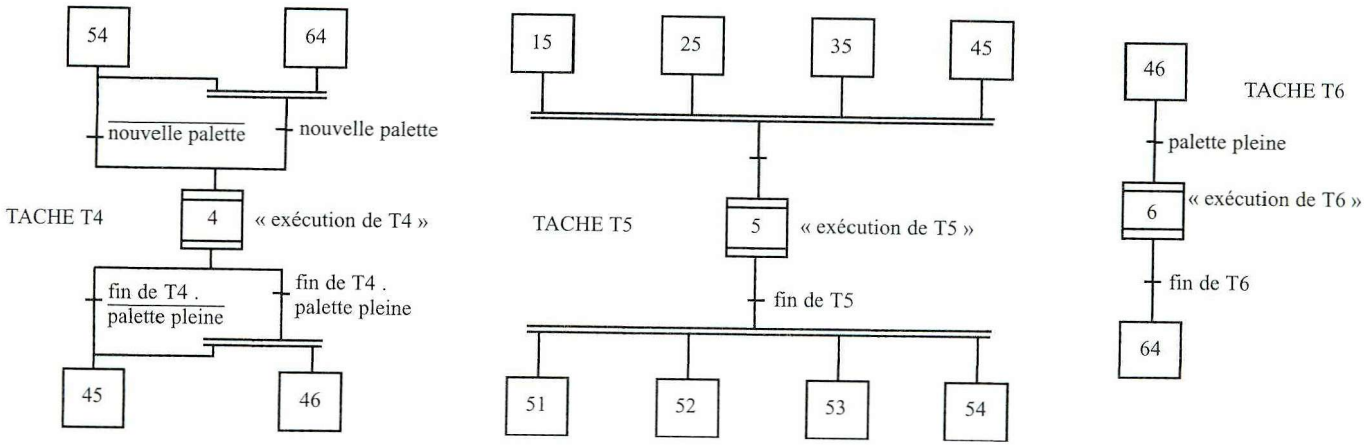


Figure 4-37b : éléments de graphe traduisant les antériorités des tâches fonctionnelles T4, T5 et T6

4.3.3.5. Elaboration du grafcet de coordination des tâches

Pour permettre l'élaboration du grafcet de coordination des tâches, on effectue l'association des éléments de graphe définis précédemment pour construire le grafcet complet. On opère alors la superposition des étapes de même repère (voir figure 4-38), en supprimant éventuellement les étapes non fonctionnelles puis on trace les liaisons entre les étapes.

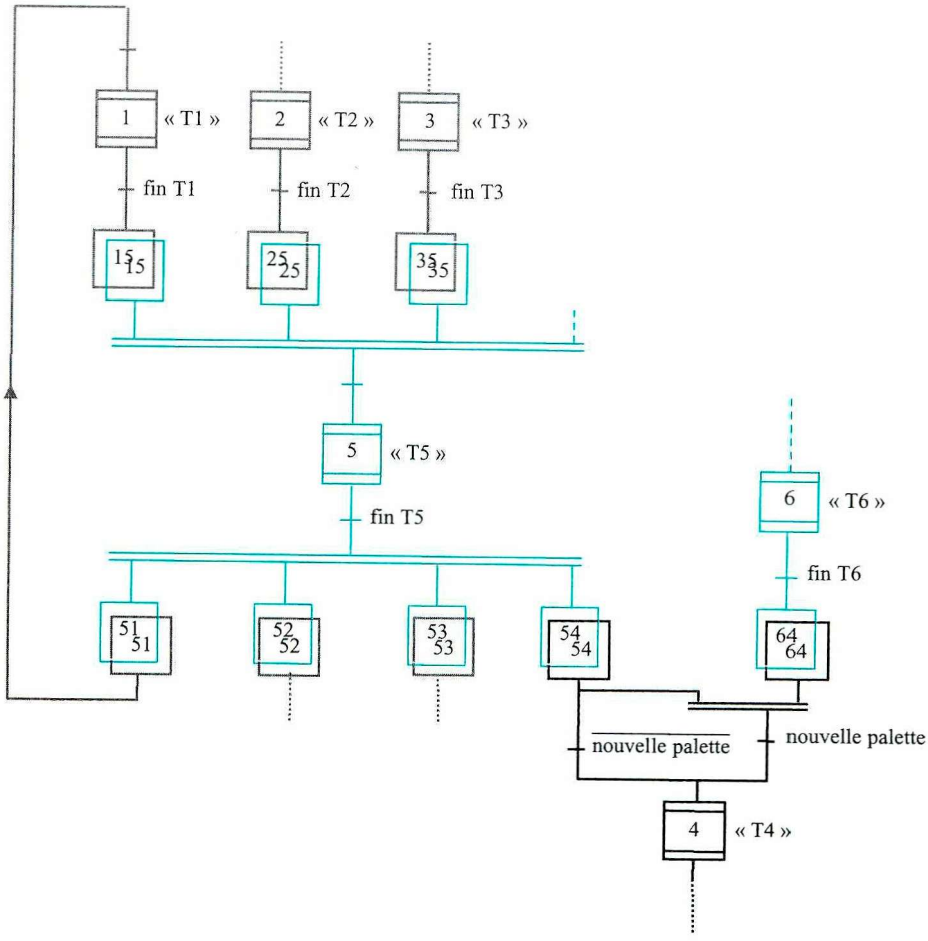


Figure 4-38 : technique de construction du grafcet de coordination des tâches

On obtient ainsi le grafcet final de la figure 4-39. Il convient de remarquer que ce grafcet ne comporte pas d'étape initiale, les conditions initiales n'étant pas encore définies à ce stade. Il est possible de déterminer cette situation initiale en faisant une étude des modes de marche et d'arrêt.

Il faut préciser que la construction d'un grafcet par recherche des antériorités possède ses limites et permettra essentiellement de synchroniser les tâches dans un mode de fonctionnement continu.

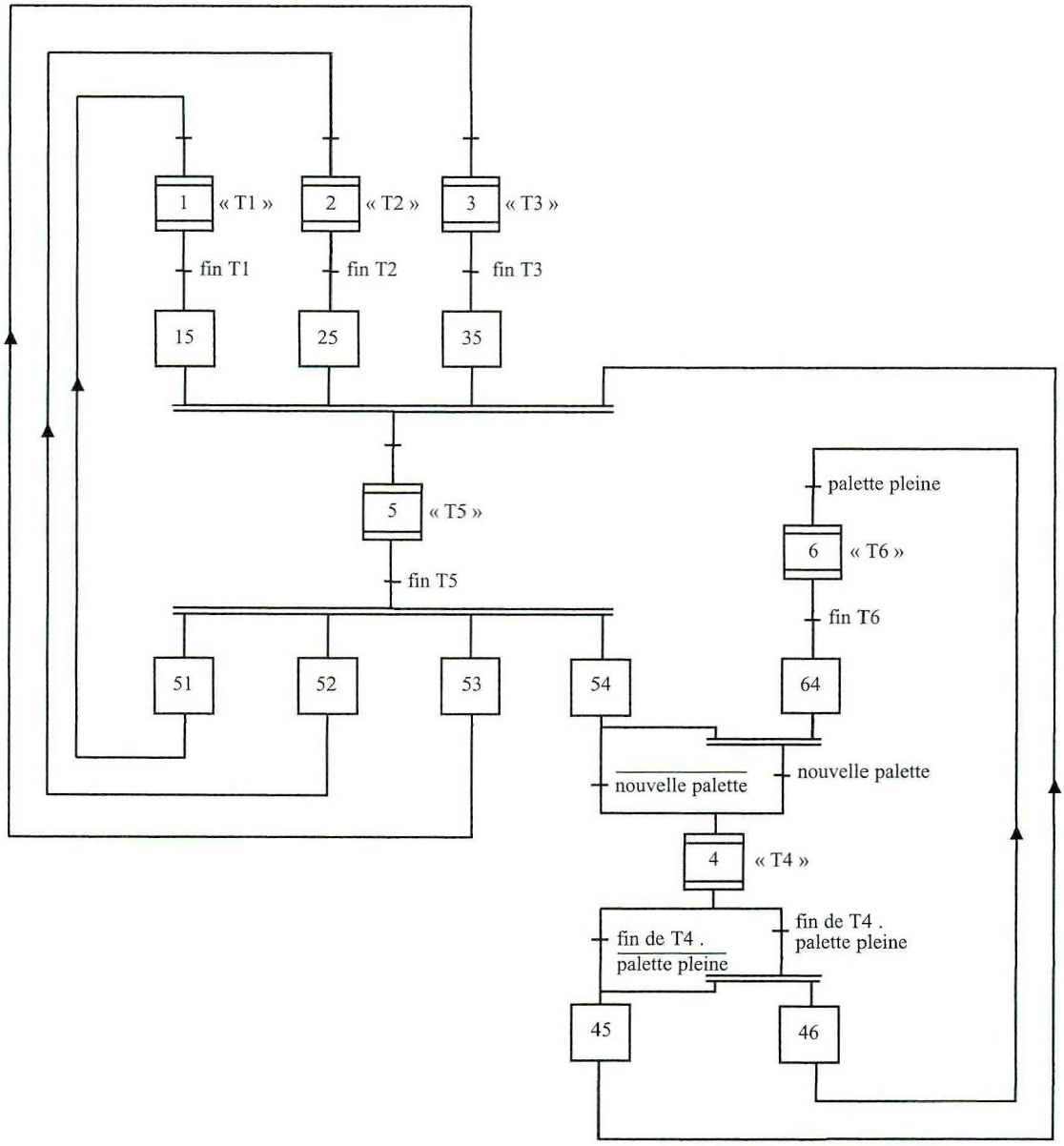


Figure 4-39 : grafcet complet résultant de cette construction

4.3.4. Construction de grafcet de modes de marche et d'arrêt

Cette dernière partie traite de la possibilité de construire un grafcet de gestion des modes de marche et d'arrêt à partir d'une description réalisée à l'aide d'une grille GEMMA (voir figure 4-40).

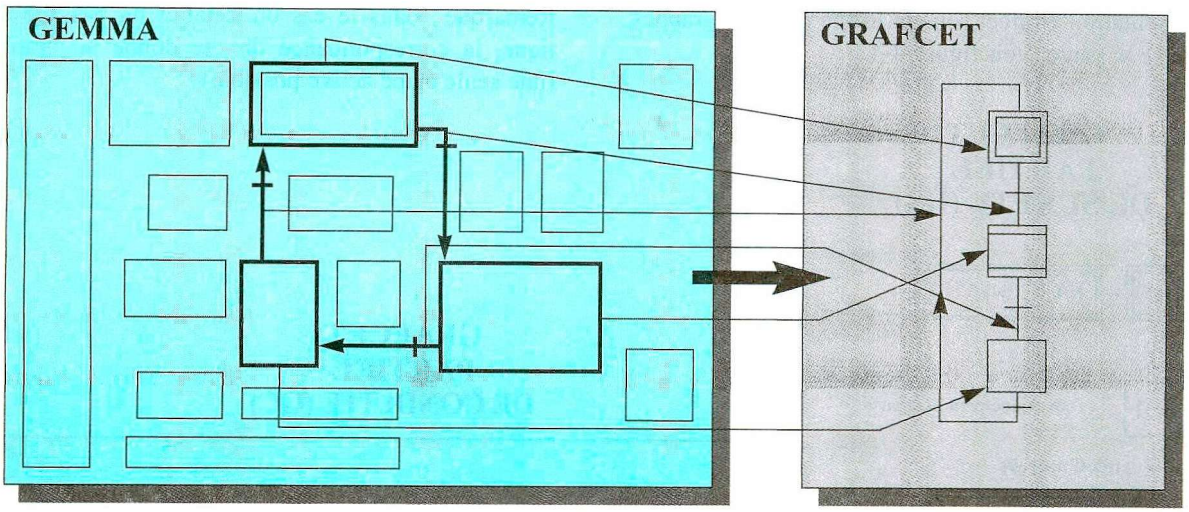


Figure 4-40 : technique de passage d'un GEMMA à un grafcet

Le GEMMA (Guide d'Etude des Modes de Marche et d'Arrêt) [ADE.81] se présente sous l'aspect d'une grille préformatée, dans laquelle il est possible de spécifier un certain nombre de comportements relatifs à différents modes de marche et d'arrêt du système. La figure 4-41 représente le GEMMA de la machine à assembler les connecteurs.

Il est possible d'établir une correspondance plus ou moins directe entre d'une part des rectangles états et les chemins définis dans un GEMMA et les étapes (ou macro-étapes) et les transitions que l'on retrouve dans toute structure de Grafcet.

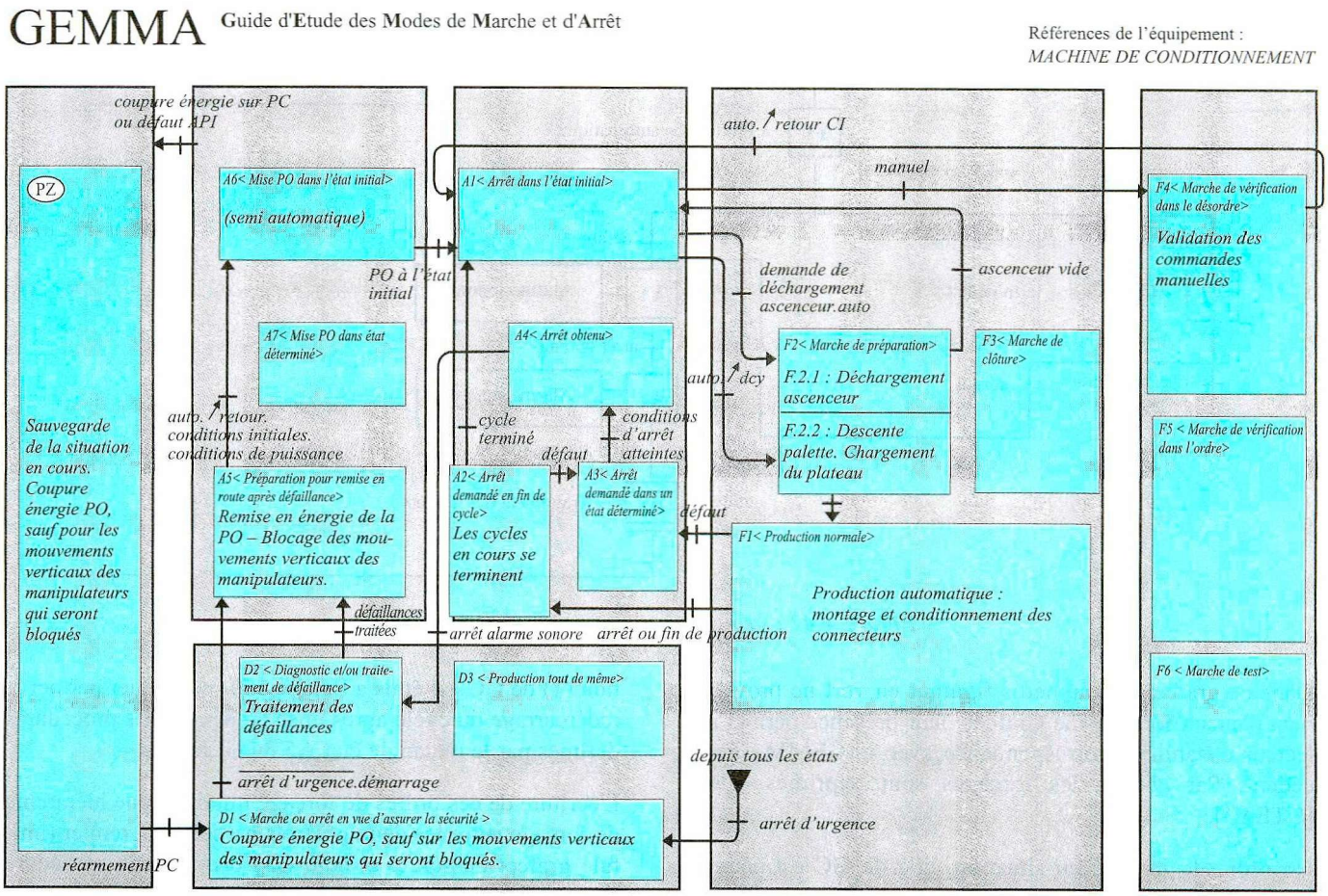


Figure 4-41 : GEMMA de la machine à assembler les connecteurs

Une représentation Grafcet sous la forme de deux graphes résulte de ce passage (voir figure 4-42).

Remarque : dans le cas où s'établit un passage systématique, la correspondance directe donne un graphe d'état (une seule étape active possible).

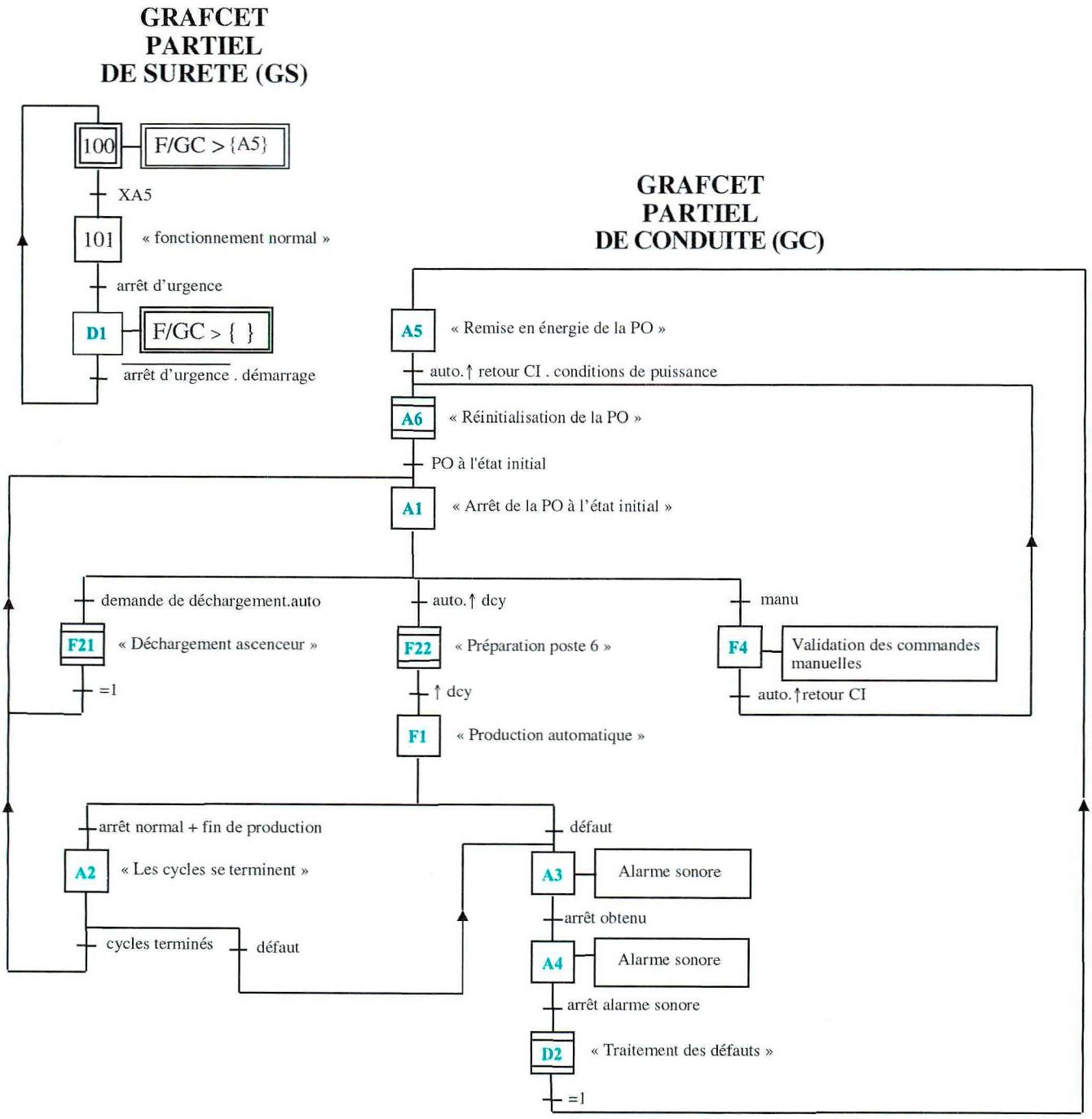


Figure 4-42 : grafcet résultant de cette démarche

Dans ce grafcet, les numéros figurant en vert ne proviennent d'aucun formalisme Grafcet; leur présence permet au lecteur d'établir la correspondance avec le GEMMA précédent. Par contre, les forçages sont exprimés selon [UTE.93].

Un ordre de forçage en situation vide de GC est émis à l'étape D1 ; il permet de désactiver tous les autre modes en cas d'arrêt d'urgence. Un autre ordre de forçage en situation (1) de GC est émis à l'étape 100; ce dernier permet le redémarrage du cycle après mise en oeuvre des procédures définies par le rectangle état A5 du GEMMA.

L'écriture de ces ordres de forçage implique une hiérarchie de forçage entre les deux grafcets partiels, le premier (intitulé grafcet de sûreté et noté GS) décrivant la procédure d'arrêt d'urgence et le second (intitulé grafcet de conduite et noté GC) décrivant les autres modes de marche et d'ar-

rêt. Le grafcet partiel de sûreté est construit à partir de la procédure définie dans la grille GEMMA au niveau des rectangles états D1 et A5.

Une des principales limites d'utilisation de cette méthode est liée à la nature des systèmes modélisables par GEMMA. Ce système doit nécessairement comporter une partie commande unique.

Une application plus détaillée de cette technique est développée dans la seconde partie du chapitre 7 et concerne le réchauffeur d'huile.

4.4. Quelle approche utiliser ?

Les quatre approches méthodologiques présentées dans ce chapitre ne sont pas concurrentes. Chacune apporte un aspect de la conception de grafcet. La première s'attache à utiliser des structures génériques réalisant des fonctions particulières. La seconde permet de prendre en compte le point de vue produit. La troisième offre la possibilité d'effectuer des synchronisations entre tâches. Enfin, la dernière apporte l'aspect modes de marche.

Cela dit, l'établissement des autres modèles amonts nécessaires à ces approches (SADT, graphiques de déroulement-matière, GEMMA, ...) n'est pas l'objet de nos préoccupations dans le cadre de cet ouvrage.

Par ailleurs, on peut envisager d'autres techniques, en particulier celle qui consiste à construire un graphe d'états (ex. méthode de Huffman) pour ensuite faire une transposition en Grafcet. Cette démarche est d'un intérêt limité car elle consiste à déporter le problème de conception par une résolution qui n'utilise pas le Grafcet.

En conclusion, on peut dire qu'il n'y a pas de « recette miracle » pour construire un grafcet complet. Certaines approches conviendront bien à des applications alors que d'autres ne sont pas envisageables, soit pour des raisons de complexité, soit à cause de difficultés d'adaptation.

Enfin, dans certains cas, l'élaboration d'un grafcet s'effectuera sans démarche particulière, quelquefois même par tâtonnement, l'expérience du concepteur jouant souvent un grand rôle.

4.5. Références bibliographiques

[ADE.81] « Le GEMMA : guide d'étude des modes de marche et d'arrêt », Brochure ADEPA (Agence pour le Développement de la Productique Appliquée à l'industrie), Edition n° 2, 1981, 32 pages ;

[ANS.79] « Process Charts », American National Standard ANSI Y 15.3, 1979, 15 pages ;

[BLA.79] « Comprendre, maîtriser et appliquer le GRAFCET », M. BLANCHARD, CEPADUES Editions, Collection Automatisation et Production, 1979, 174 pages ;

[G7W.92] « Le GRAFCET », Groupe G7W, ADEPA/AFCET, CEPADUES Editions, Collection Automatisation et Production, 1992, 144 pages ;

[GEN.92] « Utilisation des graphiques de Déroulement-Matière dans l'analyse et la conception des systèmes de conduite », D. GENDREAU, J.J. LESAGE, Actes du 3ème Congrès International de Génie Industriel, TOURS, Mars 1991, pages 583 à 592 ;

[GRE.85] « Le GRAFCET : de nouveaux concepts », GREPA, CEPADUES Editions, Collection Automatisation et Production, Décembre 1985, 104 pages ;

[IGL.89] « SADT, un langage pour communiquer », IGL TECHNOLOGY, Editions EYROLLES, 1989, 336 pages ;

[MER.86] « Une méthodologie d'analyse descendante », C. MERLAUD, Revue « L'ingénieur et le technicien de l'enseignement technique », numéros 248, 249 et 251 ;

[UTE.93] « Établissement des diagrammes fonctionnels pour systèmes de commande – Diagramme fonctionnel GRAFCET. Extension des concepts de base » Documentation de référence (Documentation et symboles graphiques) UTE C03-191, Juin 1993, 35 pages.

CHAPITRE 5

GRAFCET
ET GRAPHE D'ETATS

CHAPITRE 5
GRAFCET ET GRAPHE D'ETATS

Jusqu'à présent, nous nous sommes intéressés à la partie visible du Grafcet que ce soit en termes d'outils, de normalisation, d'utilisation et de construction. Ceci nous permet d'affirmer que le Grafcet est particulièrement adapté pour spécifier le comportement de la commande des systèmes automatisés (voir chapitre 7). Outil graphique par excellence, il permet de représenter simplement les entrées – sorties du système avec leurs liens, les contraintes de parallélisme, de synchronisation et de séquencement. Ainsi, ce modèle simple d'utilisation se trouve très largement diffusé dans le monde industriel [BRA.93] et dans l'enseignement [GEN.92]. En réalité, le synchronisme, le parallélisme et les règles d'interprétation du Grafcet lui donnent une richesse et une puissance, qui permettent d'exprimer de façon concise des comportements nombreux et complexes. Pour mettre en évidence cette puissance il suffit de décrire de façon exhaustive l'ensemble des évolutions et des états possibles d'un grafcet, sous la forme d'un graphe d'états. Les graphes d'états sont des outils d'identification du comportement des systèmes séquentiels et du comportement du Grafcet [BLA.79]. Ce chapitre montre que les graphes d'états équivalents à des grafcets simples d'apparence sont en fait de taille importante et difficilement maîtrisable lors d'une spécification. Cependant, la description exhaustive du comportement d'un grafcet permet de procéder à sa validation formelle rendue désormais nécessaire par la complexité croissante des systèmes automatisés [ZAY.97]. L'intérêt de cette validation est de prouver mathématiquement que la commande n'atteindra pas des situations dangereuses pour le système (sécurité) et décrira correctement les évolutions attendues (vivacité). Ainsi ce chapitre cherche à sensibiliser le leeteur à l'intérêt mais également aux difficultés rencontrées pour identifier et représenter le comportement dynamique d'un grafcet. Le contenu de ce chapitre s'appuie sur les définitions et les postulats temporels du Grafcet en tant que modèle coneeptuel, en faisant abstraction des contraintes liées à l'implantation sur Automate Programmable Industriel, qui font l'objet du chapitre 6 de cet ouvrage. L'intérêt de la validation est présenté au travers du poste de dépose de vis de l'application décrite en 7.1.

5.1. Graphe d'états : spécification et validation

L'élément de base de la représentation des systèmes séquentiels est le graphe d'états qui comporte deux types de nœuds différents : les places et les arcs orientés. Ce graphe décrit les différents états possibles du système ainsi que les transitions entre ces états et peut également comporter des informations sur les entrées et les sorties du système.

Pour illustrer ces propos, nous nous intéressons à la commande de deux vérins V1 et V2. Les deux vérins, présentés en figure 5-1, sont identiques et se déplacent entre les deux fins de course *vir* et *vis* suite à l'envoi des ordres *VEiR* et *VEiS* (i=1 ou 2).

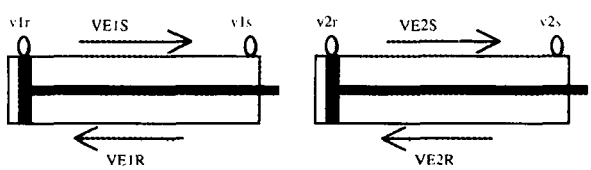


Figure 5-1 : vérins V1 et V2

La structure du système se décompose en deux parties indépendantes (Figure 5-2) : la partie opérative et la partie commande. Dans la suite de ce paragraphe, le graphe d'états est utilisé pour spécifier dans un premier temps le comportement de la partie opérative et dans un second temps, le comportement de la partie commande.

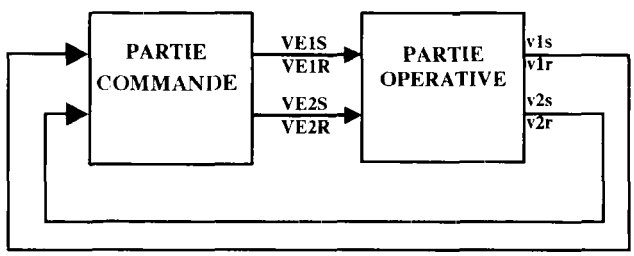


Figure 5-2 : présentation structurée de l'automatisme

5.1.1. Spécification du comportement de la partie opérative

Dans ce paragraphe, nous ne considérons que la partie opérative du vérin V1, la description pouvant être faite à l'identique pour la partie opérative du vérin V2. En situation initiale, le vérin V1 est immobile et à gauche. Le comportement du vérin V1 se représente alors sous la forme du graphe d'états de la figure 5-3. Chaque état caractérise une situation du vérin qui est associée à la présence des informations sur les capteurs (v1r et v1s). Les arcs orientés spécifient les passages entre ces différentes situations qui dépendent, soit des ordres provenant de la commande (VE1S et VE1R pour les arcs 0 et 2), soit du système lui-même (fin de la course du vérin pour les arcs 1 et 3).

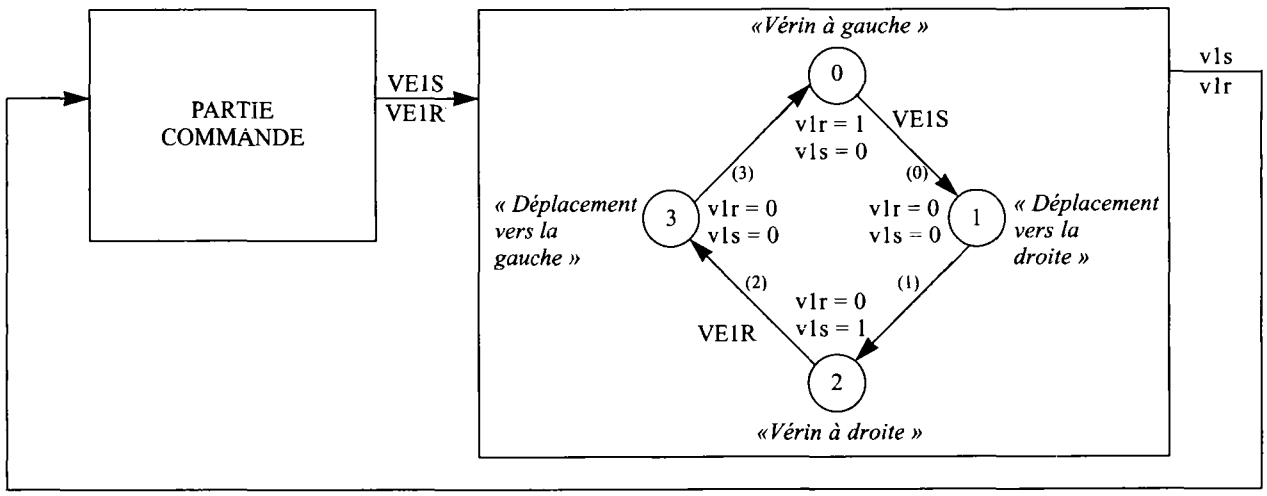


Figure 5-3 : représentation par graphe d'états de la partie opérative du vérin V1

Ainsi, les états et les arcs de ce graphe ont la signification suivante :

« Etat 0 » : le vérin est à gauche, le capteur v1r est activé.

« Arc 0 » : le système évolue de l'état 0 à l'état 1 suite à l'ordre VE1S.

« Etat 1 » : le vérin est en déplacement vers la droite, le capteur v1r est relâché.

« Arc1 » : fin de la course du vérin. Celui-ci n'est plus en déplacement, ce qui conduit le système dans l'état 2.

« Etat 2 » : le vérin est immobile à droite et le capteur v1s est actionné.

« Arc2 » : le système évolue de l'état 2 à l'état 3 suite à l'ordre VE1R.

« Etat 3 » : le vérin est en déplacement vers la gauche, le capteur v1s est relâché.

« Arc3 » : fin de course du vérin qui n'est plus en déplacement et revient à l'état 0.

5.1.2. Spécification de la commande

La spécification de la commande des deux vérins V1 et V2 peut être effectuée par le graphe d'états de la figure 5-4. Celui-ci décrit de façon exhaustive les différents scénarios d'évolutions des ordres envoyés à la partie opérative en fonction de l'évolution de la valeur des entrées de la commande.

A titre d'exemple, l'état « Etat 0 » représente l'état initial, pour lequel l'ordre de sortie du vérin 1 est envoyé au système. Suite à l'activation du capteur v1s, la commande évolue de l'état 0 à l'état 1 pour lequel l'ordre de sortie du vérin 2 est activé, l'ordre de sortie du vérin 1 étant inhibé. Les autres états et arcs sont alors élaborés de manière similaire.

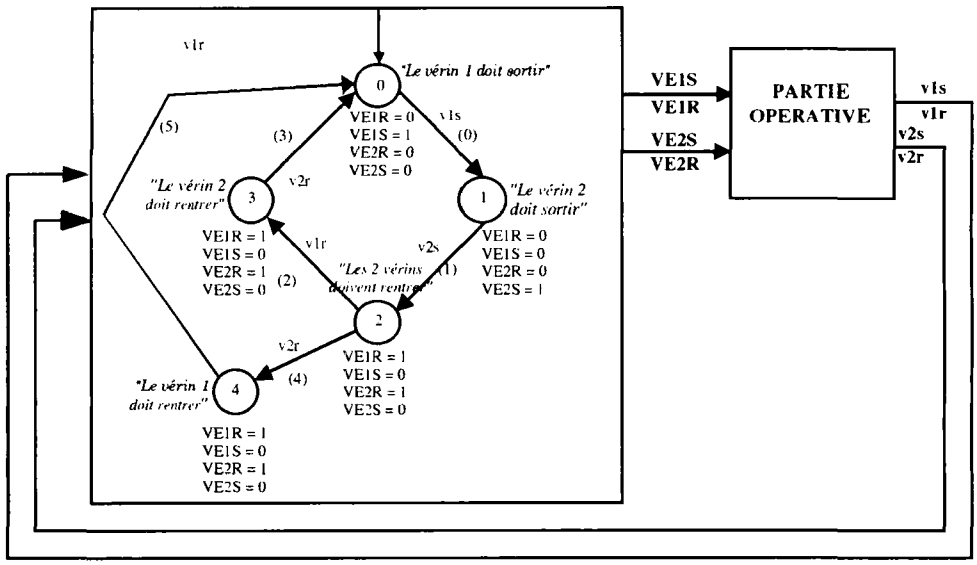


Figure 5-4 : spécification par graphe d'états de la commande de deux vérins

Une autre manière de spécifier la commande est d'utiliser le Grafcet. Le grafcet de la figure 5-5 représente ce que pourrait être la commande des deux vérins. Par rapport au graphe de la figure 5-4, la représentation sous forme de grafcet est plus concise. Cette concision s'accroît considérablement lors de la représentation de comportement contenant du parallélisme (voir figure 5-12).

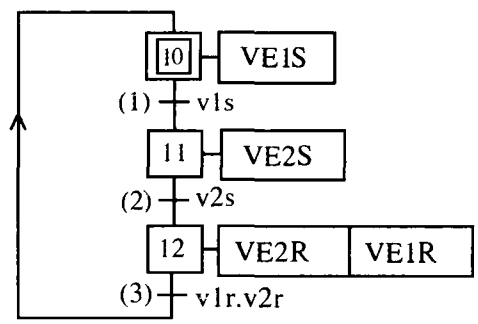


Figure 5-5 : grafcet de la commande de deux vérins

5.1.3. Principe de la validation

Les graphes d'états sont également utilisés comme entité de base pour la validation formelle de modèles. Ce type de validation consiste à prouver que certains états d'un système ne sont jamais atteints ou que certains scénarios d'évolution de ce système sont ou ne sont pas accessibles. La démarche de validation est résumée par la figure 5-6.

Ainsi, la validation du Grafcet correspond à une recherche des situations atteignables et à l'étude des évolutions entre les différentes situations.

Les propriétés à valider peuvent être exprimées textuellement ou traduites dans des langages ou modèles particuliers facilement exploitables. Ensuite, une scrutation du graphe représentant l'évolution du modèle est effectuée en fonction de la propriété à valider. L'activité de validation se termine par une affirmation positive ou négative relativement à la validité de la propriété étudiée.

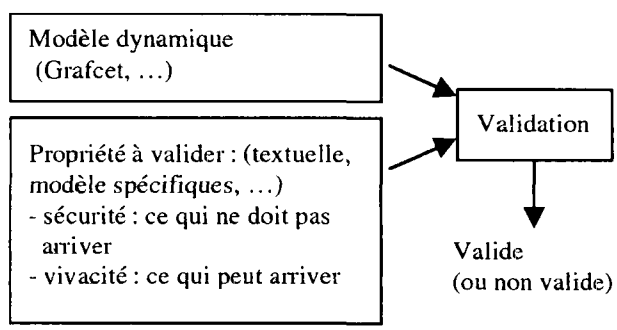


Figure 5-6 : validation formelle d'un modèle

5.2. Grafcet et graphe d'états : la problématique de la validation

Dans le reste du document, on s'intéresse uniquement à la **spécification de la commande par Grafcet** et les graphes d'état sont utilisés pour valider le Grafcet.

5.2.1. Graphe d'états d'un grafcet

Les places du graphe d'états équivalent à un grafcet, représentent ses situations atteignables et les arcs caractérisent les passages possibles entre ces situations. La règle 4 d'évolution du Grafcet stipule que si plusieurs transitions sont franchissables à un instant donné, elles sont simultanément franchies. C'est pourquoi, les arcs d'un graphe d'états représentant les évolutions d'un grafcet, peuvent correspondre au franchissement simultané de plusieurs transitions Grafcet.
La figure 5-7 illustre le graphe d'états correspondant à quelques structures de base du Grafcet :

- Un état repéré « i » ou « i, j » signifie que le Grafcet est dans une situation où les étapes actives sont respectivement « i » ou « i et j ».
- Les arcs sont libellés du numéro des transitions qui doivent être franchies pour passer de l'état de départ à l'état d'arrivée (figures 5-7a et 5-7b) ou d'une expression caractérisant la condition de franchissement de ces mêmes transitions, élaborée à l'aide de leurs réceptivités (figure 5-7c).

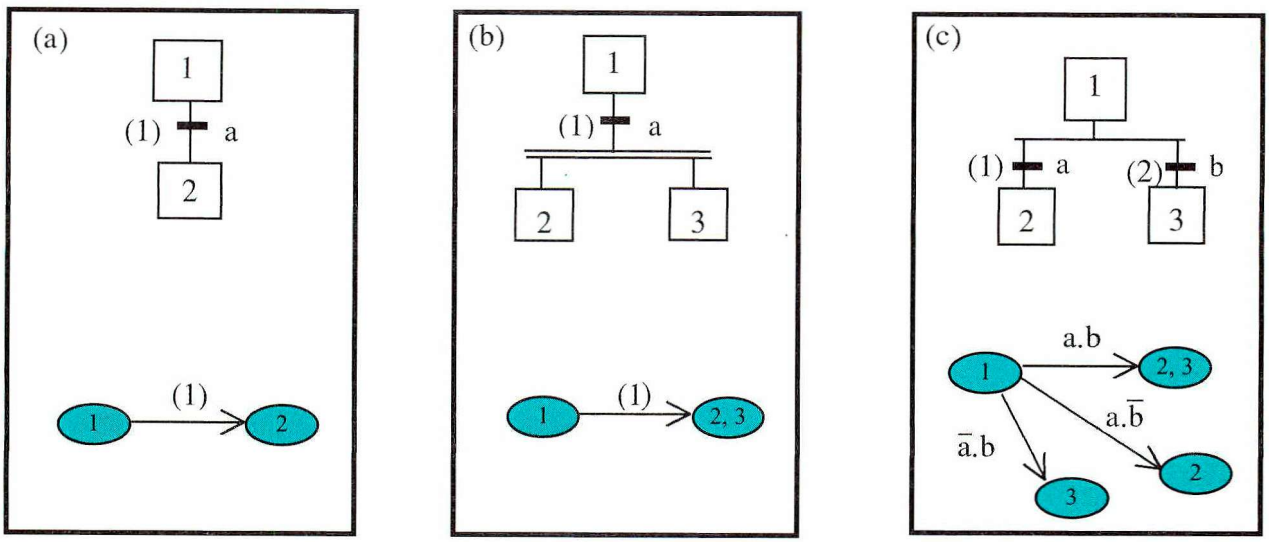


Figure 5-7 : exemple de structures Grafcet et des graphes d'état correspondant

5.2.2. Les difficultés

Les principales difficultés associées à l'élaboration d'un graphe d'états représentant les évolutions d'un grafcet sont relatives à l'explosion combinatoire du nombre de situations accessibles, au comportement temporel du Grafcet et aux difficultés d'interprétation du Grafcet.

5.2.2.1. L'explosion combinatoire

Une situation correspond à une combinaison d'étapes actives, il existe alors, au maximum, pour un grafcet possédant N étapes, 2^N situations possibles. Ce phénomène d'explosion combinatoire est un problème majeur de l'informatique car la progression exponentielle du nombre des éléments à calculer dépasse largement les limites des machines. Par exemple, supposons qu'une machine puisse calculer une situation Grafcet en une milliseconde, il lui faudra environ dix-sept minutes pour énumérer toutes les situations potentielles d'un grafcet possédant 20 étapes. Pour un nombre d'étapes double correspondant à une application moyenne, il faudra alors plus de 34 années pour aboutir au calcul de toutes les situations !

5.2.2.2. Le comportement temporel du Grafcet

Pour qu'un graphe d'états représente les évolutions d'un grafcet, il faut que le comportement de ce dernier soit clairement défini, il doit de plus répondre à la caractéristique fondamentale d'une commande ; c'est-à-dire être unique et prévisible pour toutes les évolutions d'entrée possibles. Une telle unicité peut être garantie si le modèle est *déterministe* et *réactif*.

Le *déterminisme* impose que, pour un scénario donné d'évolution des entrées, la commande n'évolue que d'une seule façon possible. En d'autres termes, en partant d'une situation quelconque, si les entrées évoluent d'une certaine manière, la commande génère une évolution précise des sorties qui sera identique à chaque fois que se présentera la même séquence d'évolution des entrées, à partir de cette même situation. Le franchissement simultané de toutes les transitions franchissables prévu par les règles d'évolution du Grafcet contribue au déterminisme du modèle.

La *réactivité* se traduit par la faculté de la commande à réagir immédiatement aux évolutions de ses entrées. Le Grafcet est un modèle qui traduit une causalité à temps nul entre ses entrées et ses sorties et contribuent donc à la réactivité du modèle.

Les cinq règles d'évolution du Grafcet tentent de garantir le déterminisme et le synchronisme attendu par un tel outil de spécification. La double échelle de temps permet de définir clairement ces notions en proposant un temps interne d'évolution du Grafcet et un temps externe sans commune mesure, qui est celui du système physique à commander (voir chapitre 2). Bien sûr, il en est tout autrement lorsqu'il s'agit de mettre en œuvre une implantation exécutable, ce point important sera abordé au chapitre suivant.

Néanmoins, l'obtention du graphe d'états équivalent au comportement du Grafcet demande de répondre à certaines questions liées à l'interprétation du Grafcet.

5.2.2.3. Les difficultés d'interprétation du Grafcet

Il existe des situations dites « instables », qui, lorsqu'elles sont atteintes, sont immédiatement quittées car elles contribuent à rendre de nouvelles transitions franchissables. C'est le cas présenté dans la figure 5-8, où l'étape 2 devient active alors que b est vrai.

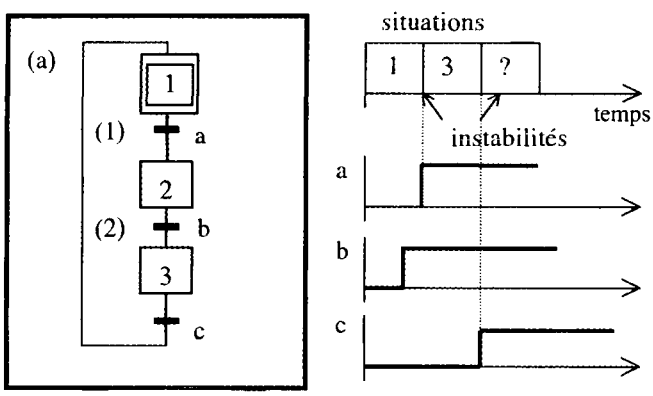


Figure 5-8 : situations instables

De telles situations, atteintes durant un temps infiniment court, doivent-elles être représentées sur le graphe d'états ?

Peuvent-elles contribuer à modifier celui-ci ?

Que devient la situation d'un grafcet en cas d'instabilité totale quand a, b, et c sont simultanément vraies ?

En fait, les réponses à ces questions ne peuvent être trouvées grâce aux cinq règles du Grafcet.

En effet, pour mesurer la pertinence de la représentation dans un graphe d'états des situations instables, il faudrait connaître leur signification, vu de « l'extérieur » du Grafcet. En particulier, il faudrait définir précisément la sémantique des actions associées aux étapes.

Plusieurs cas peuvent être envisagés (voir figure 5-9). Si la situation correspondant à l'étape 11 active est instable, l'ordre associé ne sera jamais émis et, dans ce cas, la représentation de cette situation dans le graphe d'états est inutile. Dans le cas de l'étape 13, l'incrémentation du compteur sera peut être réalisée selon la position du modèle du compteur par rapport au modèle Grafcet. L'activité fugace de l'étape 15 doit permettre le franchissement de la transition (1). Quant à l'étape 17, son activité fugace doit permettre l'émission de l'ordre de forçage associé, celui-ci étant un ordre interne du Grafcet. Dans ces deux derniers cas, cette situation doit figurer dans le graphe d'états.

Dans la suite du chapitre, nous proposons à partir d'un exemple simple, différents graphes d'états relatifs à la prise en compte de divers éléments capables d'influer sur le comportement d'un grafcet et montrant les évolutions instables ou non.

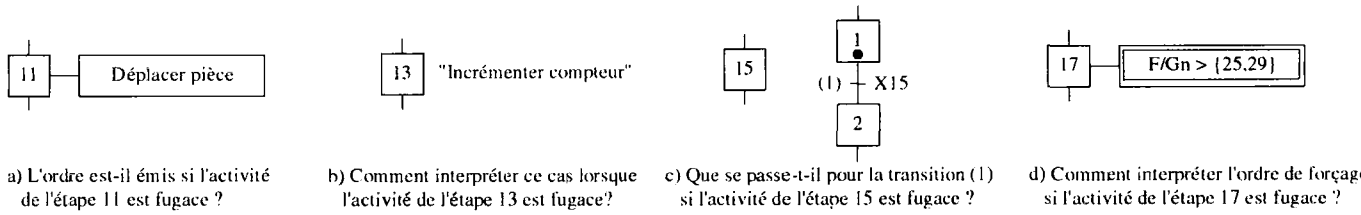


Figure 5-9 : différents types d'actions

5.3. Identification de l'évolution d'un grafcet

La prise en compte de certains éléments va contribuer à préciser l'évolution d'un grafcet :

1 – la structure du Grafcet : une étape ne peut être activée que si une de ses transitions en amont est franchie, en dehors de tout ordre de forçage ;

2 – les équations logiques des réceptivités associées aux transitions : si les réceptivités de deux transitions sont disjointes, ces transitions ne seront jamais franchissables simultanément ;

3 – les postulats temporels : deux événements externes non corrélés ne peuvent se produire au même instant et il existe une double échelle de temps ;

4 – l'évolution de la partie opérative : elle conditionne l'évolution des variables d'entrée et restreint, par conséquent, celle du grafcet.

La question essentielle concerne le degré de rigueur qu'il faut prendre en compte pour définir le graphe d'états équivalent au comportement d'un grafcet. Ce degré pouvant être nécessaire, suffisant, voire excessif selon les objectifs recherchés.

Pour illustrer notre propos, nous avons retenu deux exemples de grafcets sensiblement équivalents au niveau de la structure.

Le premier illustré par la figure 5-10, est un exemple sans réelle signification en terme d'automatisation mais il est simple et didactique et va servir de fil conducteur à l'explication.

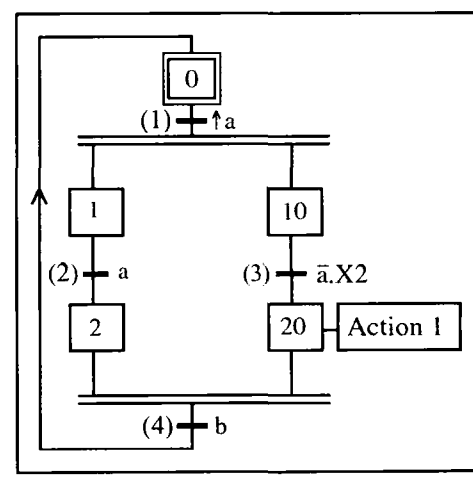


Figure 5-10 : grafcet didactique

Le second qui sera repris plus en détail au paragraphe 5.4, correspond au grafcet du poste de dépose de vis de l'application 1 présentée au chapitre 7, la structure en est rappelée figure 5-12.

5.3.1. Prise en compte de la structure

Dans ce paragraphe, le graphe d'états est réalisé en prenant en compte la situation initiale du grafcet et ses évolutions rendues possibles grâce aux successions d'étapes et de transitions sans tenir compte de l'interprétation des réceptivités. Ce graphe montre les propriétés du grafcet engendrées par sa structure.

A titre d'exemple, pour le grafcet de la figure 5-10, l'ouverture et la fermeture des séquences simultanées garantissent qu'il n'est jamais possible que l'étape 1 soit active simultanément avec l'étape 2. Le graphe résultant est représenté figure 5-11.

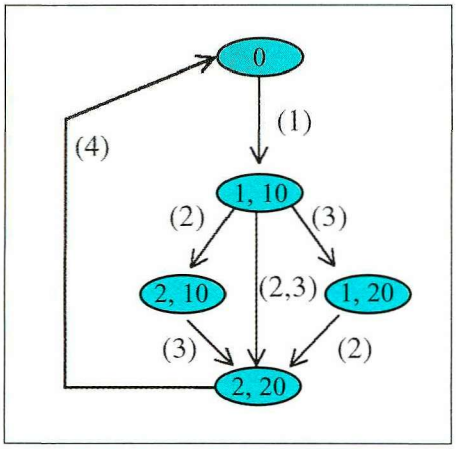


Figure 5-11 : graphe correspondant au grafcet didactique de la figure 5-10

De même, la structure du grafcet du poste n° 1 de l'application 1 du chapitre 7 et le graphe d'états correspondant sont reportés figure 5-12.

Pour ce grafcet, il existe une seule étape initiale (étape 10), donc, les règles d'évolution imposent que les étapes 10, 11, 12 et 13 seront activées séquentiellement. Suite à la désactivation de l'étape 13, la situation du grafcet est représentée par l'activation simultanée de deux étapes 14 et 1A. Chacune de ces deux étapes appartient à une des séquences {14, 15, 16, 17, 18, 19} et {1A, 1B, 1C, 1D} qui seront exécutées en parallèle. Enfin, l'étape 1E devient active, lorsque les deux séquences sont terminées c'est-à-dire lorsque les étapes 19 et 1D deviennent inactives. La désactivation de l'étape 1E implique l'activation de l'étape 10 et le retour à la situation initiale du grafcet. Ainsi, la structure du grafcet assure que les étapes {10, 11, 12, 13, 1E} ne seront jamais actives simultanément et que, seule une des étapes {14, 15, 16, 17, 18, 19} sera active simultanément avec une des étapes {1A, 1B, 1C, 1D}.

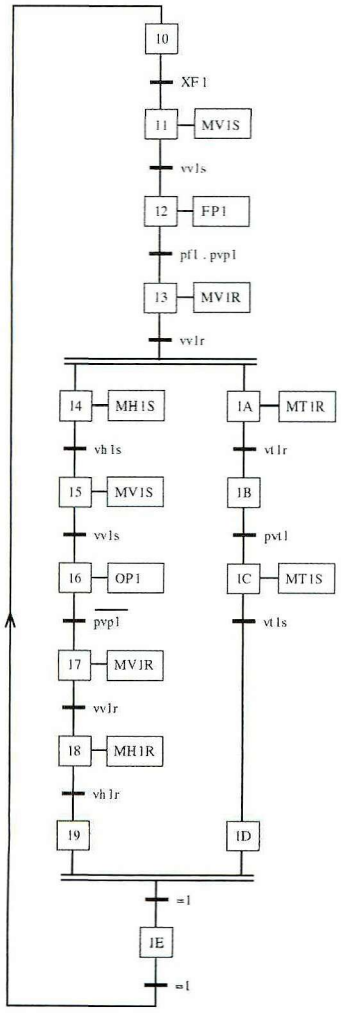


Figure 5-12a : grafcet du poste 1

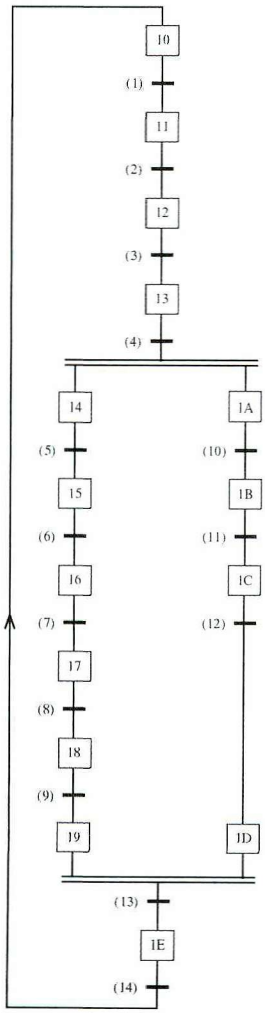


Figure 5-12b : structure du grafcet

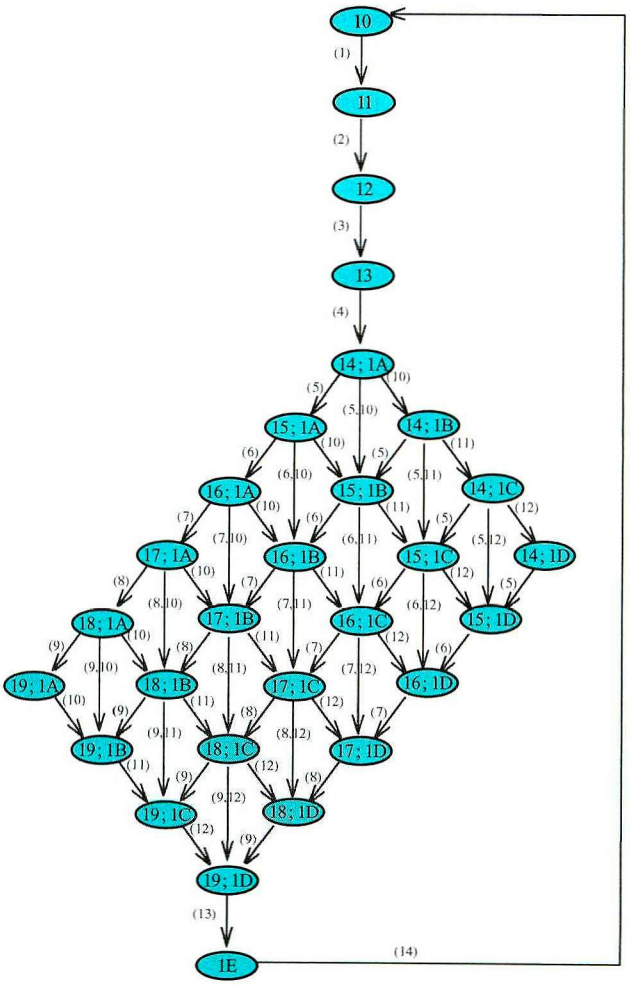


Figure 5-12c : graphe d'états par analyse de la structure seule

Le graphe d'états va alors permettre de vérifier certaines caractéristiques fondamentales d'un grafcet, comme, par exemple, s'assurer que certaines étapes ne peuvent pas être simultanément actives ou que le grafcet peut être réinitialisé. Par contre, les équations logiques des réceptivités des transitions peuvent réduire le graphe d'états et donc supprimer certaines situations ou certaines branches mais pas en ajouter. Par conséquent, ce graphe obtenu uniquement par la prise en compte de la structure du grafcet, ne permet pas de garantir qu'une situation sera réellement atteinte ou que le grafcet sera effectivement réinitialisable.

5.3.2. Prise en compte des équations logiques des réceptivités

Les équations logiques associées aux réceptivités des transitions peuvent restreindre le graphe d'états obtenu précédemment et plus particulièrement interdire certains franchissements simultanés de transitions du grafcet dont les réceptivités sont exclusives.

Dans le cas du grafcet didactique, les réceptivités des transitions (2) et (3) sont exclusives :

- Si la réceptivité de la transition (2) est vraie, celle de la transition (3) est fausse (et inversement) et ces deux transitions ne seront jamais franchies simultanément.
- La transition (3) n'est franchissable que si l'étape 2 est active. Ainsi la transition (2) sera franchie avant la transition (3).

Le graphe d'états correspondant est décrit figure 5-13, les équations logiques associées au franchissement des transitions sont indiquées sur les arcs.

Un tel graphe décrit toutes les situations atteignables par un grafcet pour tous les scénarios possibles d'évolution des entrées.

Les postulats temporels ne sont pas considérés au sein de ce type de graphe qui peut donc représenter l'évolution simultanée d'entrées ainsi que des situations instables. Une telle description ne permet pas de connaître les actions effectivement envoyées à l'environnement car celles-ci ne peuvent être émises que lors d'une situation stable.

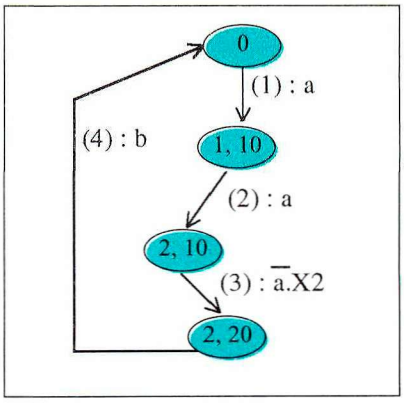


Figure 5-13 : influence de l'expression logique des réceptivités sur le graphe d'états du grafcet didactique

5.3.3. Prise en compte des postulats temporels

Les postulats temporels imposent que l'occurrence simultanée de deux événements externes est impossible. Ainsi, deux transitions dont les réceptivités sont deux fronts de deux variables d'entrées distinctes ne seront jamais franchies simultanément. Ceci permet de simplifier les graphes élaborés au paragraphe précédent.

Cependant, en l'absence de fronts au sein des réceptivités, une telle simplification n'est plus possible. Dans un tel cas, le franchissement des transitions est lié aux valeurs des variables d'entrée qui ne sont pas connues a priori. Ainsi, à partir d'une situation d'un grafcet, si les réceptivités des transitions validées ne s'excluent pas temporellement ou logiquement, il faut considérer que :

- si une ou plusieurs transitions sont immédiatement franchissables, alors la situation courante est instable ;
- si aucune transition n'est franchissable immédiatement et qu'il faut attendre l'évolution d'une ou plusieurs entrées, alors la situation est stable.

Une étude des évolutions successives des entrées qui ont mené à une situation donnée, permet de préciser la nature de cette situation : stable ou instable. Il est alors possible de représenter l'évolution du Grafcet en terme de situations stables et donc vu de l'échelle des temps externes.

5.3.3.1. Graphe d'évolution à l'échelle des temps externes

A l'échelle des temps externes, le Grafcet évolue à temps nul et les situations instables ne sont pas vues.

Pour le grafcet didactique, à l'état initial, lorsque l'entrée **a** devient vraie, le grafcet évolue vers une situation instable {1, 10} puis vers la situation stable {2, 10}. A partir de la situation {2, 10}, si la variable **b** est vraie au moment où **a** devient fausse, le grafcet évolue vers la situation instable {2, 20} avant de rejoindre la situation stable {0}. Il existe donc un arc reliant directement la situation {2, 10} à la situation {0}. Par contre, si la variable **b** est fausse au moment où la variable **a** devient fausse, le grafcet évolue de la situation {2,10} à la situation stable {2,20}. Une telle interprétation donne le graphe d'états de la figure 5-14. Les arcs sont libellés par la condition logique sur les entrées qui provoque l'évolution du grafcet.

Toutes les situations représentées étant stables, il est possible de leur associer les actions des étapes actives qu'elles caractérisent et ainsi obtenir les scénarios d'actions activées durant l'évolution du grafcet, en fonction de l'évolution des entrées. Ceci ne concerne que les actions continues et non pas les actions particulières telles que les actions temporisées ou retardées. Dans le cadre de cet ouvrage, l'élaboration du graphe des situations accessibles stables est décrite de façon intuitive. Elle a été formalisée par le biais d'un algorithme développé par J.M. Roussel du LURPA de Cachan [ROU.94].

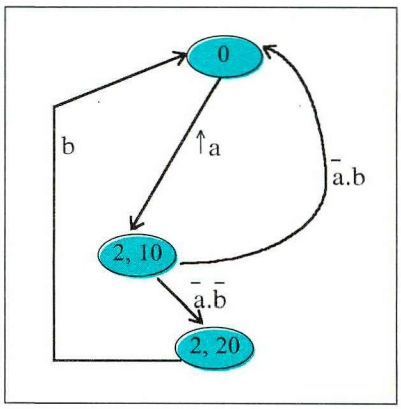


Figure 5-14 : réduction du graphe par observation à l'échelle des temps externes

5.3.3.2. Explosion combinatoire du nombre des évolutions possibles

La représentation précédente mène à une explosion combinatoire du nombre de transitions du graphe correspondant. En effet, aucune hypothèse n'est faite, a priori, sur la valeur des entrées du Grafcet et il est possible de considérer, à l'instant initial, toutes les combinaisons de ces valeurs. Chacune de ces combinaisons peut mener à une situation différente. Reprenons le grafcet du poste 1 (application n° 1 du chapitre 7), il existe en partant de l'état initial (étape 10), **11** évolutions possibles vers des situations stables, qui sont fonctions de la valeur des variables d'entrées. Le début du graphe est représenté sur la figure 5-15, sachant que le nombre total d'arcs est de **218 avec 29 états**.

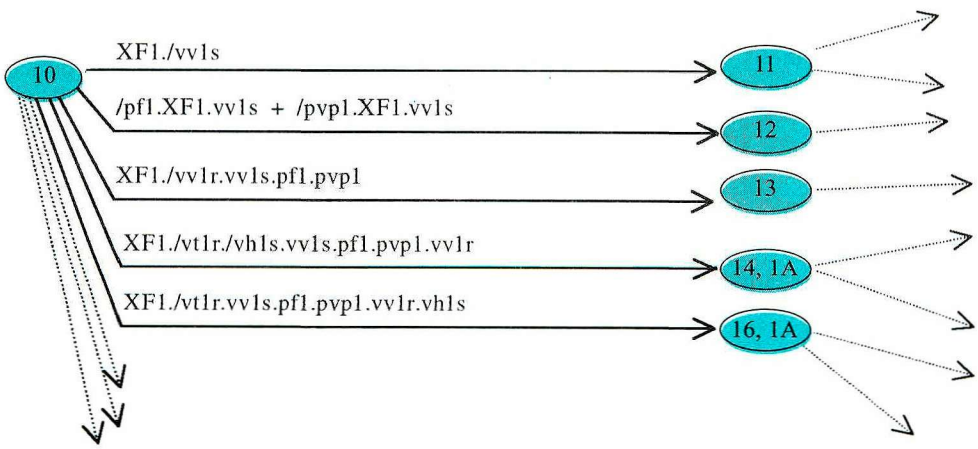


Figure 5-15 : début du graphe représentant les évolutions possibles du grafcet de l'exemple support n° 1

En fait, ce graphe décrit l'évolution « maximale » du grafcet, c'est-à-dire en considérant que la partie opérative peut faire « n'importe quoi ». En réalité, le comportement du grafcet sera certainement plus restreint puisque la partie opérative réduit le nombre des scénarios possibles des entrées du grafcet et introduit des contraintes quant à l'évolution des valeurs des réceptivités des transitions. Néanmoins, cette évolution maximale peut permettre de prendre en compte certaines défaillances de la partie opérative.

5.3.4. Prise en compte de la partie opérative

La prise en compte du comportement de la partie opérative et de ses interactions avec la commande décrite par Grafcet permet de déterminer le graphe d'états représentant son comportement effectif au sein du système.

Pour l'exemple didactique, supposons que la partie opérative implique que l'entrée **b** soit toujours vraie avant que l'entrée **a** ne soit fausse. En prenant le graphe d'états de la figure 5-11 et en appliquant cette hypothèse, le graphe correspondant, vu de l'extérieur, devient alors celui de la figure 5-16.

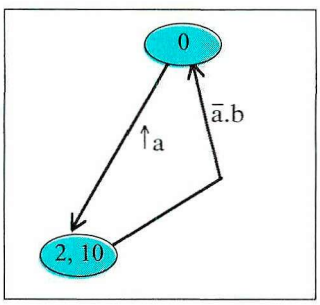


Figure 5-16 : réduction du graphe par la prise en compte de la partie opérative

Dans l'exemple du poste 1 de l'application n° 1, le vérin MV1 ne peut être à la fois en haut et en bas, ce qui empêche les capteurs vv1r et vv1s d'être actionnés en même temps. La prise en compte de cette remarque entraîne une nette diminution du nombre de transitions du graphe qui passe alors de **218 à 126**. Si la même règle est appliquée aux vérins MH1 et MT1, le nombre de transitions du graphe devient alors égal à **102**.

Par conséquent, la prise en compte de la partie opérative réduit la taille du graphe. Notons qu'il existe deux classes de contraintes introduites par le comportement de la partie opérative :

- des contraintes logiques, qui correspondent à l'impossibilité pour certaines entrées du grafcet d'être vraies ou fausses au même moment, et qui empêchent certaines réceptivités d'être vraies en même temps,
- des contraintes temporelles, qui reflètent les scénarios d'évolutions possibles des entrées du grafcet et qui influent sur l'enchaînement du franchissement des transitions du grafcet.

Bien que la partie opérative améliore considérablement la détermination des évolutions effectives d'un grafcet au sein d'un système automatisé, sa prise en compte et donc sa modélisation se trouvent confrontées aux problèmes suivants :

- **Problème sémantique :** Il faut utiliser un modèle adapté à la représentation des systèmes physiques lesquels sont dotés d'un comportement asynchrone et non déterministe.
- **Problème d'interface :** Il faut modéliser les interactions entre la partie opérative et la partie commande, c'est-à-dire faire communiquer et coopérer des modèles de nature différente afin de tracer le graphe d'états global du système.
- **Problème de rigueur :** La modélisation d'un système physique est caractérisée par la finesse de sa représentation. Par exemple, le fonctionnement d'un vérin peut être représenté par deux états (rentré, sorti) ou par trois états (rentré, entre-deux, sorti) avec ou sans prise en compte de phénomènes physiques connus (vitesse du vérin) voire inconnus (fuite, panne, rupture). De même, l'inertie du système et plus généralement, les temps d'évolutions des composantes du système empêchent l'existence de certaines situations. Il existe donc un degré de finesse dans la modélisation de la partie opérative, dont le choix dépend principalement de ce que l'on cherche à faire avec le graphe calculé.

5.4. Validation en phase de conception d'un grafcet

Pour illustrer de manière plus concrète nos propos, nous étudions l'implication de la validation sur le poste n° 1 de l'application décrite en 7.1. (figure 5-17) qui réalise deux fonctions F1 et F2 :

- F1 : sélection d'une vis par le tiroir d'alimentation
- F2 : chargement d'une vis par le manipulateur

Dans ce paragraphe, nous nous intéressons à une seule propriété et nous considérons la partie opérative en fonctionnement normal (i.e. les capteurs ne donnent pas d'informations erronées). Dans le cas d'une validation complète, il faut recenser toutes les propriétés pertinentes vis à vis de la partie opérative et s'intéresser également aux fonctionnements en mode dégradé.

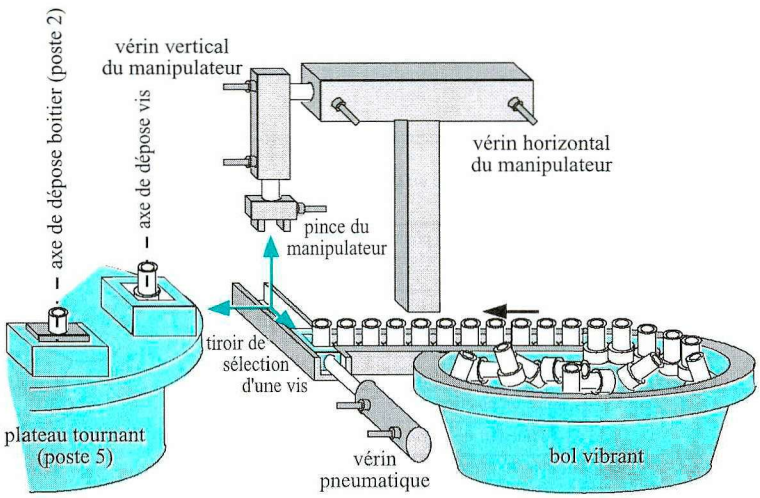


Figure 5-17 : schéma d'implantation du Poste 1

5.4.1. Première approche de modélisation : description intuitive

Une première modélisation de la partie commande peut être décrite à l'aide du grafcet de la figure 5-18. Il représente l'enchaînement séquentiel des deux fonctions réalisées par le poste n° 1 et reflète ainsi le parcours d'une vis à ce poste.

Si aucune hypothèse n'est faite au niveau du scénario d'évolution des entrées, le graphe d'états correspondant à la figure 5-18 est difficilement exploitable au regard du comportement effectif de la partie opérative (voir § 5.3.1.) Comme l'étude porte sur le système en fonctionnement normal, il est alors possible de réduire le nombre des scénarios possibles des entrées du grafcet et ainsi considérer que toutes les situations atteignables sont stables. Le graphe d'états correspondant est celui de la figure 5-19.

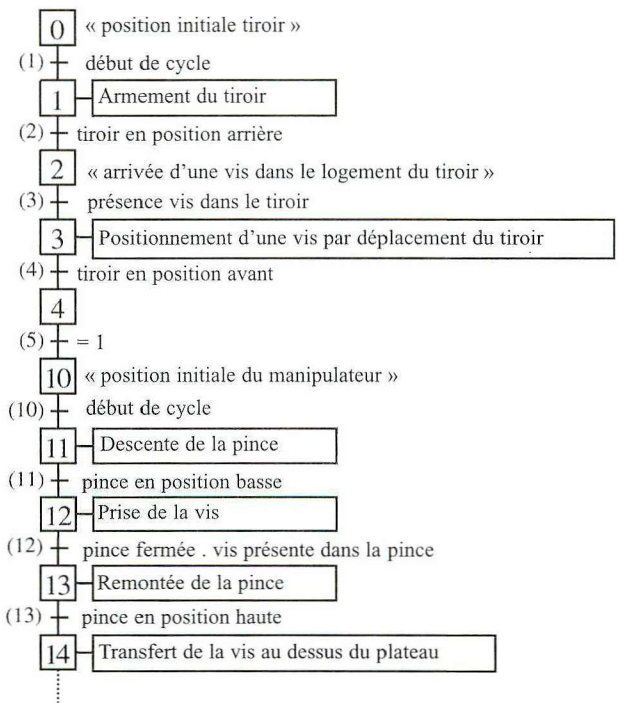


Figure 5-18 : commande séquentielle du système

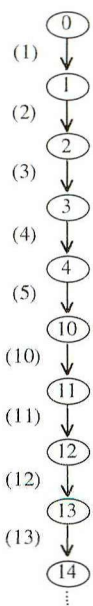


Figure 5-19 : graphe d'états correspondant au grafcet en fonctionnement normal

Il y a identité entre le grafcet et le graphe d'états correspondant. Cette solution ne présente aucun problème particulier au niveau sécurité. Par contre, les ressources sont utilisées de façon sous-optimale, les deux fonctions ne s'effectuant pas en parallèle. La durée de cycle est alors la somme des durées de cycle de F1 et F2.

5.4.2. Deuxième approche de modélisation : optimisation du fonctionnement

Pour optimiser la production par réduction de la durée de cycle, il est envisageable d'exécuter en parallèle les deux fonctions F1 et F2. La durée se trouve réduite à la durée de cycle de la fonction la plus longue à exécuter. Le grafcet se présente sous la forme de deux séquences parallèles (figure 5-20). Le graphe d'états correspondant (figure 5-21) va permettre d'identifier d'éventuelles situations dangereuses, soit pour le système, soit pour son environnement.

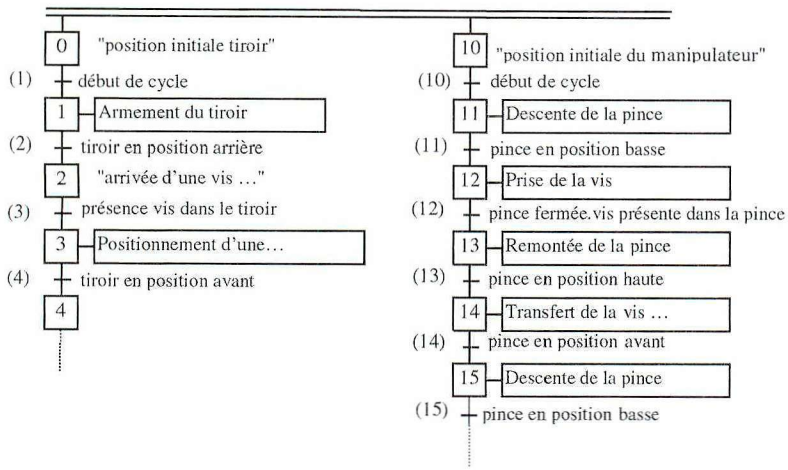


Figure 5-20 : grafcet optimisé

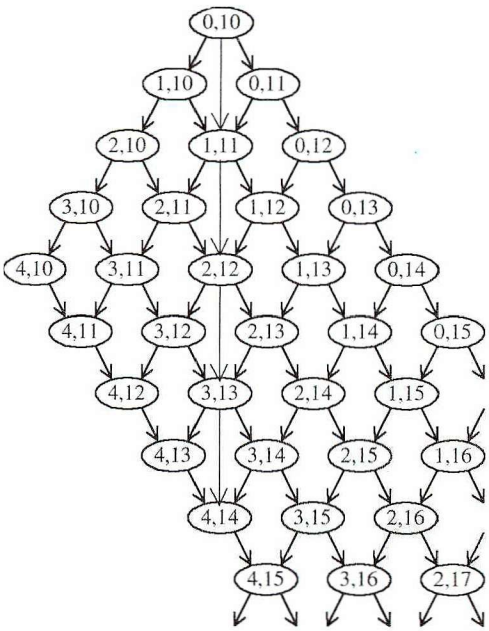


Figure 5-21 : graphe d'états du grafcet optimisé

5.4.3. Phase de validation de la conception

Au vu de la configuration du système, il est nécessaire de s'assurer qu'il n'existe pas d'évolution dangereuse comme par exemple la collision entre le vérin pneumatique et la pince du manipulateur.

La validation formelle consiste ici à s'assurer que les situations pour lesquelles les deux mouvements du tiroir « Armement du tiroir » (étape 1) et « Positionnement d'une vis par déplacement du tiroir » (étape 3) ne se produisent pas en même temps que la « Descente de la pince » (étape 11) ou la « Prise de la vis » (étape 12) ou la « Remontée de la pince » (étape 13). Les situations conduisant à ces dysfonctionnements sont mises en évidence (en vert) sur la figure 5-22.

Il est donc nécessaire d'interdire les transitions menant à ces situations conflictuelles.

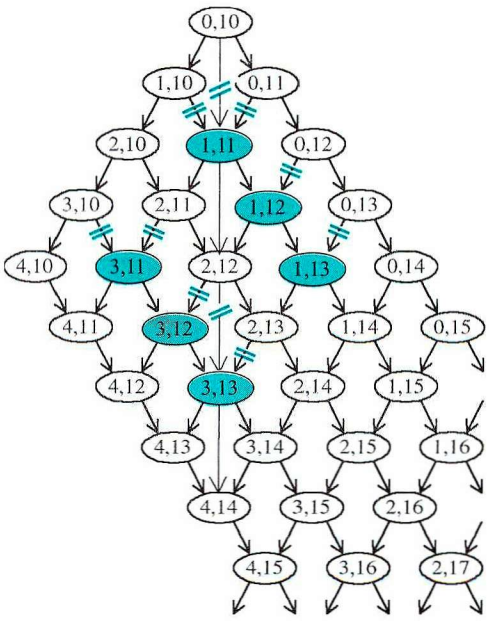


Figure 5-22 : Evolutions interdites

5.4.4. Vers l'obtention d'un grafcet sécurisé

La phase de correction suit logiquement la phase de validation. Pour notre cas, il est nécessaire d'interdire les évolutions suivantes :

- le passage de la situation {0,10} à la situation {1,11} donc le franchissement des transitions entre 0 et 1 et entre 10 et 11 lorsque 0 et 10 sont actives,
- le passage de la situation {1,10} à la situation {1,11} donc le franchissement de la transition entre 10 et 11 lorsque 1 est active,
- le passage de la situation {0,11} à la situation {1,11} donc le franchissement de la transition entre 0 et 1 lorsque 11 est active,
- le passage de la situation {0,12} à la situation {1,12} donc le franchissement de la transition entre 0 et 1 lorsque 12 est active,
- le passage de la situation {0,13} à la situation {1,13} donc le franchissement de la transition entre 0 et 1 lorsque 13 est active,
- le passage de la situation {3,10} à la situation {3,11} donc le franchissement de la transition entre 10 et 11 lorsque 3 est active,
- le passage de la situation {2,11} à la situation {3,11} donc le franchissement de la transition entre 2 et 3 lorsque 11 est active,
- le passage de la situation {2,12} à la situation {3,12} donc le franchissement de la transition entre 2 et 3 lorsque 12 est active,
- le passage de la situation {2,12} à la situation {3,13} donc le franchissement des transitions entre 2 et 3 et entre 12 et 13 lorsque 2 et 12 sont actives,
- le passage de la situation {2,13} à la situation {3,13} donc le franchissement de la transition entre 2 et 3 lorsque 13 est active.

Ces interdictions peuvent être effectuées par ajout de variables d'étapes dans les réceptivités des transitions (figure 5-23). Le graphe d'états résultant est présenté figure 5-24.

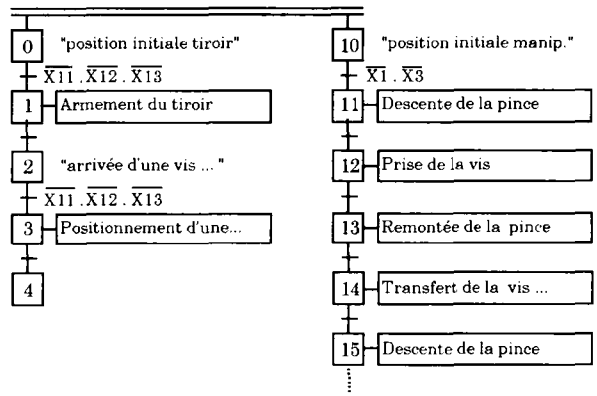


Figure 5-23 : grafcet avec prise en compte des restrictions

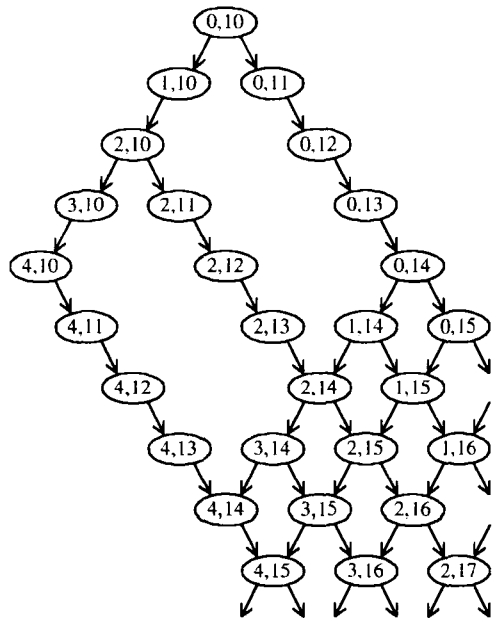


Figure 5-24 : graphe d'états du grafcet corrigé

Une autre manière de résoudre les conflits correspond à la figure 5-25 dont le graphe d'états est représenté figure 5-26. Les flèches en gras représente le parcours imposé par le grafcet, les situations à éviter n'étant pas atteignables. Cette solution qui est plus lisible car elle n'inclue pas de variables d'étapes, est celle retenue pour la description du poste n° 1 au chapitre 7.

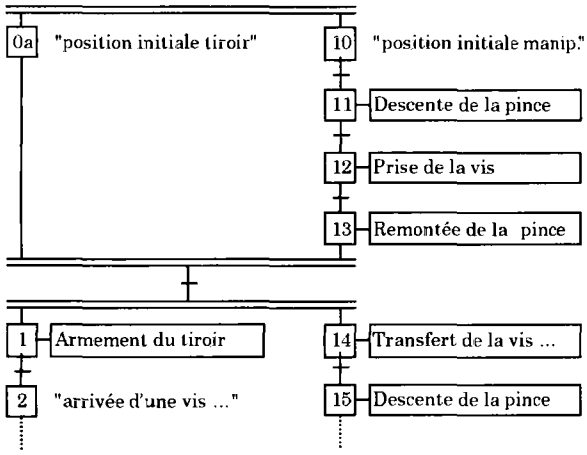


Figure 5-25 : solution retenue pour la commande du poste

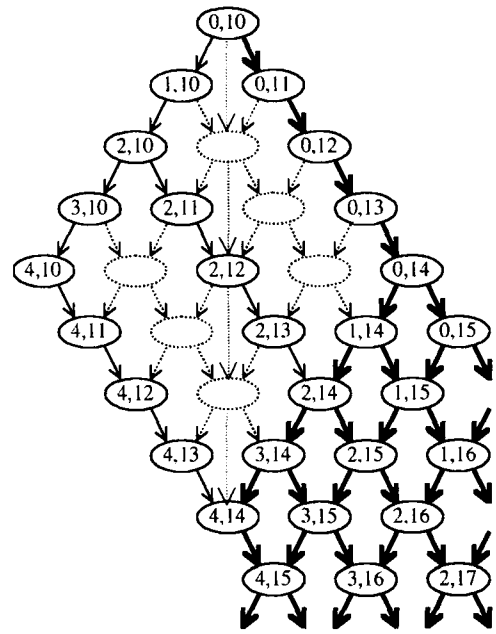


Figure 5-26 : graphe d'états de la solution retenue

5.5. Quel graphe pour quoi faire ?

Dans notre étude, l'objectif principal de l'élaboration d'un graphe d'états représentant l'évolution d'un grafcet est de procéder à l'étude de son comportement de façon rigoureuse et exhaustive à des fins de validation. En effet, même s'il existe des outils de validation par simulation, cette technique ne permet pas de connaître tous les comportements possibles du grafcet, car elle est basée sur un choix de scénarios d'apparition des grandeurs d'entrées qui conditionne le résultat de la simulation. A l'inverse, un graphe d'états utilisé pour rendre compte, de façon exhaustive, des évolutions d'un grafcet nous permet une validation formelle. Cependant, nous venons de mettre en évidence deux éléments essentiels :

1 – Le Grafcet génère une explosion combinatoire du nombre des situations et des évolutions possibles qui peuvent être calculés.

2 – Il est possible de définir différents graphes reflétant les comportements d'un grafcet selon différents aspects :

- **Structurel**, c'est-à-dire simplement en prenant en considération les évolutions dues à la description graphique du Grafcet : cette description, bien que peu révélatrice du comportement effectif du Grafcet, peut tout de même mettre en évidence certains problèmes majeurs comme le fait qu'un grafcet ne peut, par sa structure, être réinitialisable.
- **Logique**, c'est-à-dire en examinant les évolutions dues aux réceptivités et en tenant compte de l'aspect structurel. Cette description précise celle obtenue par l'étude de la structure mais ne garantit pas le respect des postulats temporels.
- **Temporel**, c'est-à-dire en ajoutant les postulats temporels tels que la double échelle de temps et la non-occurrence simultanée d'événements externes : ceci permet d'obtenir le graphe des situations accessibles stables qui décrit le comportement de la commande quel que soit le scénario des entrées. Il va permettre de s'assurer que certaines situations à risque, impliquant des dysfonctionnements, ne seront pas atteignables, indépendamment de la partie opérative.
- **Contextuel**, c'est-à-dire en incluant la partie opérative et les trois aspects, logique, structurel et temporel, précédents : lorsque la partie opérative est considérée, le comportement du graphe représente les évolutions du Grafcet au sein du système en prenant en compte les contraintes de causalité entre les entrées et les sorties de la partie opérative. Il est alors possible de valider des propriétés de vivacité et de sécurité. Notons que la prise en compte de la partie opérative peut être faite avec différents degrés de finesse ou d'exactitude et permet alors d'étudier le fonctionnement dans des modes de marche normaux, dégradés, spécifiques et pertinents afin de s'assurer de la sûreté de fonctionnement du système.

Des outils basés sur le développement de ces graphes et sur l'extraction de propriétés émergent progressivement du domaine de la recherche. Parmi ces travaux, ceux de [ROU.94] s'attachent à calculer le graphe des situations stables accessibles. Ceux de [GAF.96] portent sur l'utilisation de langages synchrones pour valider les grafcets. Les travaux de [MAR.96] proposent de prendre en compte les temporisations du Grafcet et ceux de [DEL.96] introduisent le comportement de la partie opérative.

5.6. Références bibliographiques

[BLA.79] « Comprendre, maîtriser et appliquer le GRAFCET », M. BLANCHARD, CEPADUES Editions, Collection Automatisation et Production, 1979 ;

[BRA.93] « La pénétration industrielle du grafcet », P. BRARD, Université d'Eté 1993 – ENS de CACHAN, 8 au 13 Juillet 1993, pages 123 à 128 ;

[DEL.96] « Du TTM/RTTL pour la validation des systèmes commandés par Grafcet », P. DE LOOR, Thèse de doctorat de l'Université de Reims Champagne Ardenne, 1996 ;

[FRA.93] « Elements for a semantics of the time in Grafcet and dynamic systems using non-standard analysis », J.P. FRACHET, G. COLOMBARI, Revue APII-RAIRO, Editions HERMES, vol. 27, n° 1, 1993 ;

[GAF.96] « Le modèle Grafcet : réflexion et intégration dans une plate-forme multiformalisme synchrone », D. GAFFE, Thèse de doctorat de l'université de Nice-Sophia Antipolis, 1996 ;

[GEN.92] « Grafcet et Enseignement : où en est-on ? », D. GENDREAU, Congrès GRAFCET'92, Grafcet : Théorie et Applications, PARIS, 25-26 mars 1992, pages 149 à 162 ;

[LHO.97] « Comportement temporel du Grafcet », P. LHOSTE, J.M. FAURE, J.J. LESAGE et J. ZAYTOON, Journal Européen des Systèmes Automatisés, RAIRO-APII-JESA, Editions HERMES, vol. 31, n° 4, pages 695 à 711 ;

[MAR.96] « Modelling and Verification of temporized GRAFCET », L. MARCE, D. L'HER, P. LE PARC, CESA'96 Multiconference, LILLE, 1996, pages 783 à 788 ;

[ROU.94] « Analyse de grafcets par génération logique de l'automate équivalent », J.M. ROUSSEL, Thèse de doctorat de l'Ecole Normale Supérieure de CACHAN, 1994 ;

[UTE.93] « Établissement des diagrammes fonctionnels pour systèmes de commande – Diagramme fonctionnel GRAFCET. Extension des concepts de base » Documentation de référence (Documentation et symboles graphiques) UTE C03-191, Juin 1993, 35 pages ;

[ZAY.97] « Vérification et validation du Grafcet », J. ZAYTOON, J.J. LESAGE, L. MARCE, J.M. FAURE et P. LHOSTE, Journal Européen des Systèmes Automatisés, RAIRO-API-JESA, Hermès, vol. 31, n° 4, pages 713 à 740.

CHAPITRE 6

DISTANCE ENTRE MODELE GRAFCET ET SON IMPLANTATION

CHAPITRE 6
DISTANCE ENTRE MODELE GRAFCET ET SON IMPLANTATION

Le modèle, une abstraction du réel ...

La connaissance et la description rationnelle du monde qui nous entoure, nous conduit à une abstraction qui se traduit par des modèles s'appuyant sur des concepts et des symboles. Cette modélisation est très efficace pour représenter le réel et en faciliter la compréhension mais nous devons en accepter certains revers.

Tandis que nous définissons plus précisément nos concepts, nous élaborons des relations de plus en plus rigoureuses et abstraites qui se détachent de plus en plus du réel auquel ils se rapportent.

Avec de tels modèles conceptuels nous ne pouvons attendre qu'une représentation approximative de la réalité mais c'est toujours au travers de ces modèles que nous représenterons cette réalité car ils sont plus faciles à comprendre. Nous aurons naturellement tendance à confondre le modèle et le réel et à prendre les concepts et les symboles pour la réalité elle-même.

Nous devons en permanence avoir à l'esprit qu'une modélisation introduit toujours une certaine approximation appelée distance, entre le réel et son modèle, et que le modèle est d'autant plus pertinent que cette distance est réduite.

L'illustration de la figure 6-1 met en évidence cette distance dans le cas d'une carte géographique où l'on passe d'un réel en trois dimensions à un modèle plan. La carte est une traduction et une réduction de la réalité. Elle a ses limites. C'est à l'utilisateur d'être conscient de celles-ci.

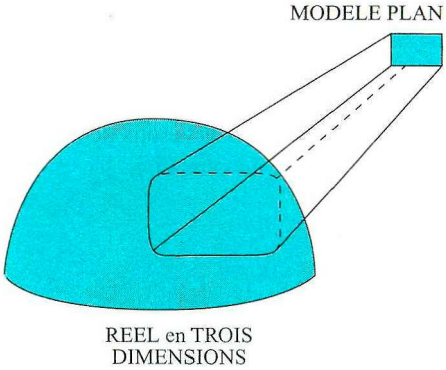


Figure 6-1 : distance modèle – réel

NOTA : On pourra se reporter au premier chapitre pour approfondir cette notion de modèle.

6.1. Modélisation du fonctionnement des systèmes automatisés

6.1.1. Le modèle Grafcet

Le modèle Grafcet est un modèle de description de la commande des systèmes automatisés à caractère séquentiel. Dans le cas particulier des systèmes automatisés, le réel est le résultat de la création humaine. Le modèle a alors essentiellement trois vocations :

- Lors de la conception : il est un élément essentiel du cahier des charges, de ce fait, il doit être déterministe et reconnu par tous les acteurs du projet afin que le fonctionnement du système soit défini sans ambiguïté.
- Lors de l'intégration et de la recette : il est un outil de test, d'analyse et de validation.
- Lors de la mise au point, de l'exploitation et de la maintenance : il devient un élément d'aide à la compréhension du fonctionnement du système, donc d'assistance au réglage, à l'exploitation et au dépannage.

Il faut noter que, comme il est montré dans le chapitre 3, durant le cycle de vie du système automatisé, le modèle Grafcet pourra être utilisé selon des points de vue et des finalités différents, avec une gradation de la finesse de description et en intégrant plus ou moins de contraintes technologiques.

Cela en fait un outil qui s'adapte aux besoins de la description souhaitée.

Par exemple, on pourra faire une description par macro-étapes pour définir globalement les tâches opératives que doit réaliser le système étudié ; ou bien encore décrire, dans le détail, les ordres que doit envoyer la partie commande à un préactionneur (et cela en fonction des particularités techniques des composants associés aux différentes chaînes fonctionnelles du système).

Les concepteurs du modèle Grafcet ont voulu un modèle rigoureux et déterministe tout en étant conscients des écarts qu'il présentera avec le réel et en particulier avec les technologies, très évolutives, de la partie commande des systèmes automatisés.

En conséquence, à tous les niveaux de description, une distance entre le modèle et le réel existera, distance qu'il sera nécessaire de connaître, d'apprécier et de maîtriser.

Cette distance peut être perçue en approche externe ou en approche interne par rapport au système que l'on décrit.

6.1.2. Les deux approches ...

En approche externe le système est considéré comme une boîte noire dont on observe les entrées et les sorties.
Le système est alors perçu au travers de son comportement (relation cause-effet) et on définit le pourquoi sans avoir accès au comment.
Dans cette approche nous observerons des distances essentiellement liées au retard de causalité.

En approche interne l'observateur connaît complètement la façon dont le système exploite les données d'entrée pour élaborer les sorties.

La connaissance intime du fonctionnement permet d'observer des distances modèle-réel plus fines : par exemple la non-simultanéité de franchissement de transitions, des variables sur front à durée non nulle, des traitements séquentiels de l'information alors qu'ils devraient être simultanés ...

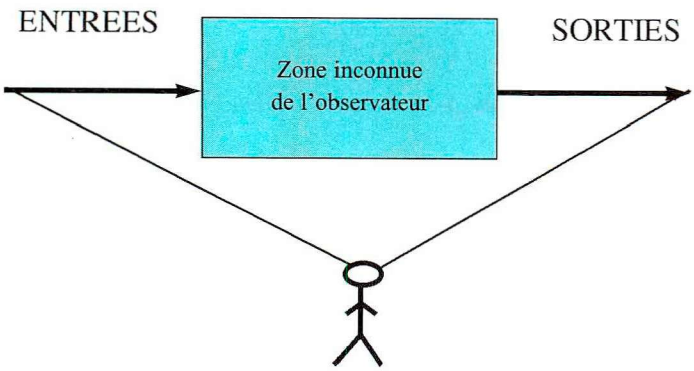


Figure 6-2 : approche externe

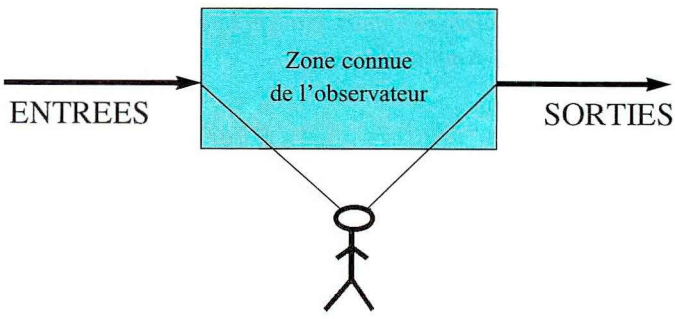


Figure 6-3 : approche interne

6.1.3. Les distances

La figure 6.4. montre qu'il existe plusieurs distances qui conduisent à obtenir un comportement réel du système différent du comportement imaginé par le spécificateur.

Dans les paragraphes suivants, nous nous proposons d'illustrer ces différentes sources de distance entre le modèle **Grafcet** et le **réel** et entre le modèle **Grafcet** et son **implantation.**

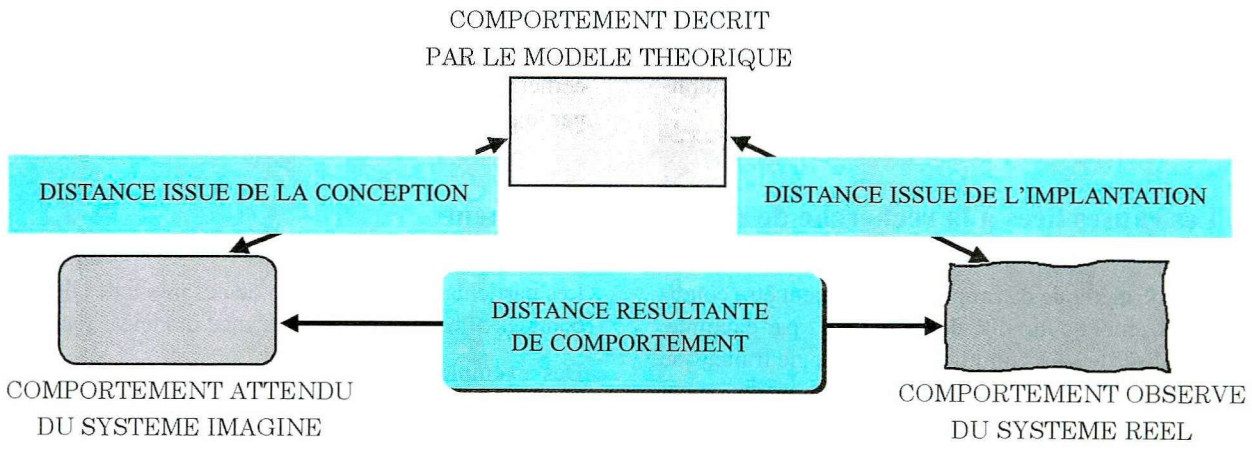


Figure 6-4 : les distances ...

6.2. La réalisation programmée d'une spécification Grafcet sur des automates programmables industriels

Distance entre modèle et son implantation

La réalisation programmée d'une spécification Grafcet sur des automates programmables industriels ou sur des ordinateurs introduit nécessairement une distance entre le modèle et son implantation. Si on s'intéresse essentiellement à la programmation des A.P.I., nous pouvons localiser certaines causes de cette distance :

6.2.1. Les causes liées au couple Grafcet – logique programmée

Le Grafcet est par essence un modèle fortement parallèle (règles 4 et 5), or le traitement programmé d'un algorithme permettant d'exécuter le Grafcet sur un système monoprocesseur, ne peut être que séquentiel. Cette association **Grafcet – logique programmée** introduit donc un antagonisme qui se traduit par une distance. Toutefois les techniques de programmation utilisées permettent en général d'obtenir un fonctionnement apparent en approche externe (au retard de causalité près) conforme à celui attendu par le modèle. C'est l'approche interne qui laissera apparaître l'essentiel des divergences.

6.2.2. Les causes liées aux techniques de traitement des A.P.I.

Le traitement cyclique synchrone ou asynchrone vis à vis des E/S, le traitement sur interruption, le traitement avec ou sans recherche de stabilité ... sont autant de techniques possibles de fonctionnement des automates programmables industriels. Elles introduisent, chacune avec leurs particularités, une distance avec le modèle Grafcet.

6.2.3. Le langage de programmation

Parmi les langages de programmation des A.P.I. on trouvera le plus fréquemment des langages textuels de type procédures informatiques ou des langages graphiques exprimant des fonctions logiques et numériques.
La norme CEI/IEC 1131-3 [NFE.93] définit :

- une « primitive de structuration » : Sequential Function Chart (SFC) ou Diagramme fonctionnel en séquence,
- deux langages graphiques :
  - Fonction Block Diagram (FBD) ou langage en blocs fonctionnels,
  - Ladder Diagram (LD) ou langage à contacts,
- deux langages littéraux :
  - Structured Text (ST) ou langage littéral structuré,
  - Instruction List (IL) ou liste d'instructions.

Ces langages permettent une traduction du Grafcet plus ou moins proche du modèle et une réponse à des contraintes comme la recherche de rapidité de traitement ou la simplicité d'écriture.

Les saisies graphiques directes du Grafcet introduisent également une distance [FAU.93], en général difficile à cerner, en raison de la non maîtrise du code généré à l'A.P.I. par le post processeur du logiciel de programmation utilisé.

6.2.4. Les causes liées à la recherche de rapidité de traitement

Le choix d'une méthode de programmation peut être conditionné par un souci de rapidité de traitement : par exemple, on pourra utiliser le saut conditionnel afin de ne traiter que certaines parties d'un programme, programmer en appel réponse afin de réduire la longueur du programme ou bien gérer des interruptions pour la prise en compte rapide d'événements.

Les particularités de chacune de ces méthodes devront être connues afin de réduire la distance modèle – réel.

Des exemples liés à ces quatre causes de distance sont développés dans les paragraphes suivants.

6.3. Sources de distances entre le réel, la spécification Grafcet et sa réalisation programmée

6.3.1. Par rapport aux événements externes et internes

Rappel de deux principes liés aux événements internes et externes :

- L'événement (↑ a) est une information de spectre temporel nul (durée nulle).
- La simultanéité d'événements externes non corrélés ne peut pas exister (↑ a . ↑ b = 0), par contre la simultanéité d'événements internes est possible (conséquence des règles 3 et 4).

Remarque : il est évident que « la simultanéité technologique » qui dépendra de la durée d'exécution des programmes implantés dans la P.C. est tout autre ; en effet :

- deux événements externes formellement distincts pourront être vus comme simultanés en raison de la période d'échantillonnage de la P.C. ;
- deux événements internes formellement simultanés pourront être vus par la P.C. comme non simultanés en raison de la technique de traitement, de la structure du programme ou de la méthode de traduction du modèle Grafcet ;
- la durée de maintien technologique d'un front n'est évidemment pas nulle car sa prise en compte nécessite un traitement.

6.3.1.1. Exemple de simultanéité d'événements externes non corrélés

La simultanéité technologique est liée au traitement cyclique des A.P.I.

Le grafcet ci-contre est repris de la figure 4-10d et comporte une sélection de séquences rendue exclusive par propriété des fronts de variable.

En effet, la simultanéité d'apparition de deux événements externes non corrélés étant exclue, à partir de la situation (3) les situations accessibles, selon l'occurrence de a ou b, sont : la situation (4) ou la situation (5), la situation (4, 5) étant alors non atteignable.

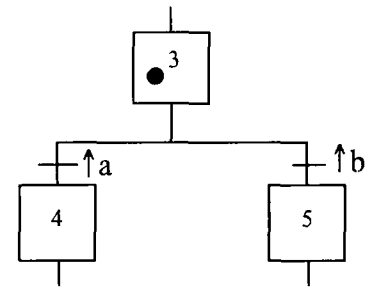


Figure 6-5 : exemple de spécification

Dans le cas d'un traitement du Grafcet par un automate programmable à traitement cyclique on peut décomposer le cycle en trois phases :

- une phase **E** d'acquisition des variables d'entrée,
- une phase **T** de traitement,
- une phase **S** de mise à jour des variables de sortie.

Dans le cas où le temps de cycle[1] est constant, pour une même occurrence des deux variables d'entrée a et b, nous pouvons avoir, vu de l'A.P.I., quatre prises en compte différentes de ces variables a et b, selon l'instant de début de cycle (voir figure 6-6).

Le cas 1 montre une chronologie d'apparition des variables externes a et b qui a pour conséquence la seule prise en compte de la variable a.

Le traitement du grafcet de la figure 6-5 permettra alors une évolution de la situation (3) vers la situation (4) ce qui est conforme à la situation attendue par le modèle.

Le cas 2 montre une chronologie d'apparition des variables externes a et b qui a pour conséquence une prise en compte de ces variables lors d'un même cycle de traitement. Elles sont donc vues par l'A.P.I. comme étant simultanées.

Le traitement du grafcet permettra alors une évolution de la situation (3) vers la situation (4, 5). Cette évolution est en contradiction avec le modèle qui exclut la simultanéité d'apparition d'événements externes non corrélés.

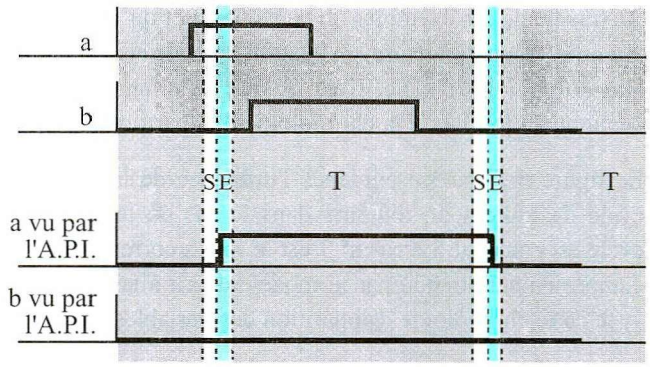
Le cas 3 montre une chronologie d'apparition des variables externes a et b qui a pour conséquence la non prise en compte de la variable a.

En effet, cette variable a n'est pas présente lors des phases d'acquisition des entrées E.

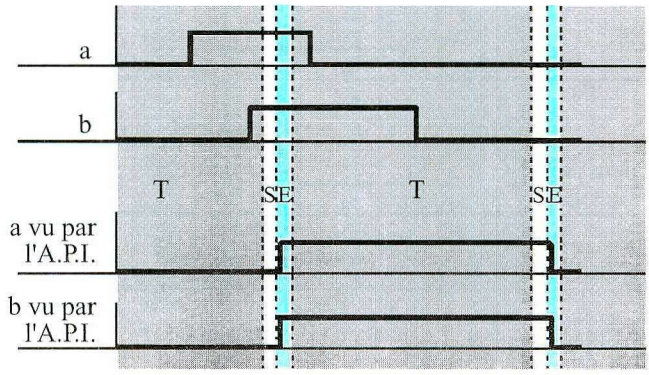
Le traitement du grafcet permettra alors une évolution de la situation (3) vers la situation (5) alors que c'est la situation (4) qui devrait être atteinte.

Le cas 4 montre une chronologie d'apparition des variables externes a et b telles qu'aucune des variables a et b n'est prise en compte par l'A.P.I.

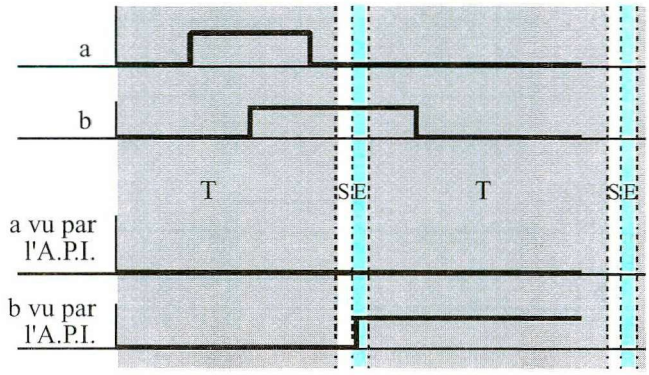
Le traitement du grafcet n'engendre alors aucun changement de situation alors que le modèle en attendait un.



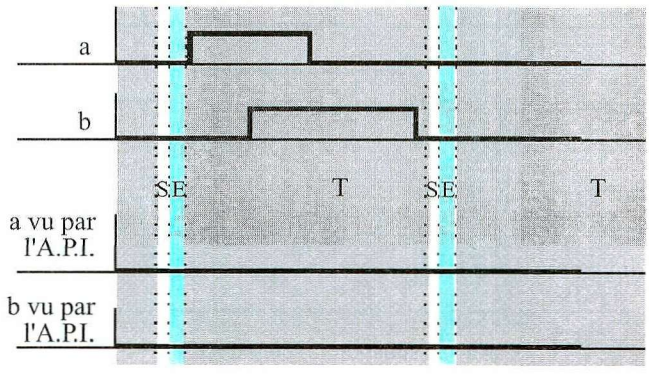
Cas n° 1 : situation (3) → situation (4)



Cas n° 2 : situation (3) → situation (4,5)



Cas n° 3 : situation (3) → situation (5)



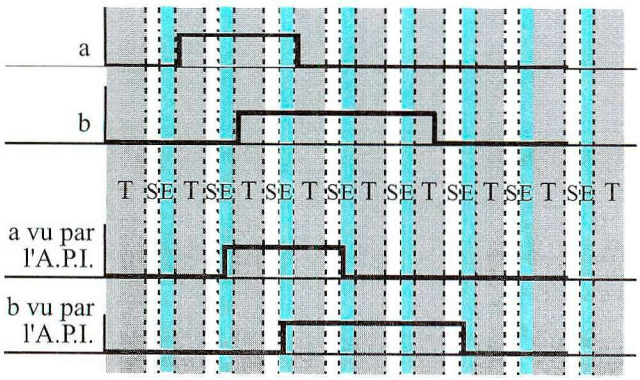
Cas n° 4 : situation (3) conservée

Figure 6-6 : comportement réel d'un A.P.I. selon son instant de début de cycle

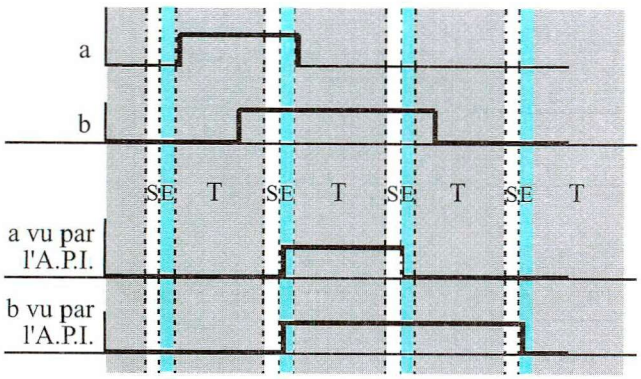
1. Cette expression, employée abusivement, correspond à la « durée de cycle ».

Au travers de ces exemples on peut constater qu'il n'y a pas toujours adéquation entre la situation obtenue et la situation attendue par le modèle. Cela est dû, pour un traitement cyclique de l'A.P.I., à la chronologie d'apparition.

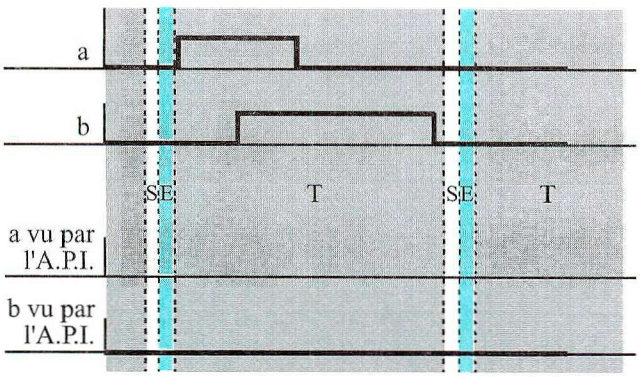
La figure 6-7 met en évidence l'influence de la durée du cycle de traitement, toujours dans le cas où le temps de cycle est constant. Le cas n° 1 est le seul à correspondre au comportement attendu par le modèle décrit à la figure 6-4 avec cette chronologie d'apparition des variables a et b.



Cas n° 1 : situation (3) → situation (4)



Cas n° 2 : situation (3) → situation (4,5)



Cas n° 3 : situation (3) conservée

Figure 6-7 : comportement réel d'un A.P.I. selon la durée de son cycle

Il peut être également évoqué le traitement sur A.P.I. à temps de cyle non constant. Les différents cas envisagés sont similaires à ceux de la figure 6-6.

Enfin, il existe la possibilité d'avoir un traitement non cyclique, qui peut procéder par interruption. Cela fait également intervenir un autre problème.

L'indéterminisme mis en évidence dans ces différents exemples pose le problème de la non traduction du cahier des charges et peut remettre en cause l'analyse initialement faite.

Pour être sûr de construire un grafcet qui ne posera aucun problème lors de l'exécution du programme correspondant sur la machine cible, il faut soit se garantir d'une écriture des réceptivités qui exclut toute évolution indésirable, soit connaître le fonctionnement intime de la P.C. Par contre, ces contraintes sont contradictoires avec l'approche de la modélisation par Grafcet qui exclut la prise en compte de la technologie d'implantation.

6.3.1.2. Exemple de simultanéité d'événements internes

La prise en compte de cette simultanéité est liée à la méthode d'implantation du Grafcet dans l'A.P.I.

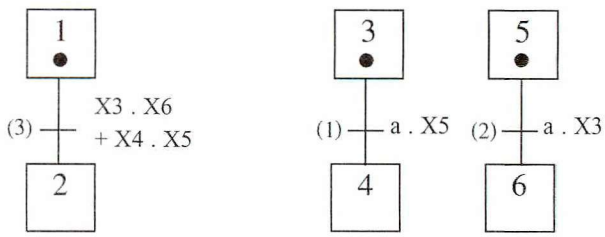


Figure 6-8 : Simultanéité d'événements internes

Le grafcet de la figure 6-8 montre qu'à partir de la situation (1,3,5), l'apparition de « a » va conduire à la situation (1,4,6). En aucun cas, on ne parviendra à activer l'étape 2.

Selon le type de programmation, il peut ne pas y avoir la traduction du franchissement simultané des deux transitions simultanément franchissables notées (1) et (2). Dans ce cas la situation (1,4,6) n'est jamais atteinte. Le risque est d'obtenir le franchissement de la transition (3).

6.3.1.3. Exemple de durée de maintien d'une entrée vue de la P.C.

Sur un automate à traitement cyclique une entrée doit être maintenue au moins un temps de cycle pour être prise en compte.

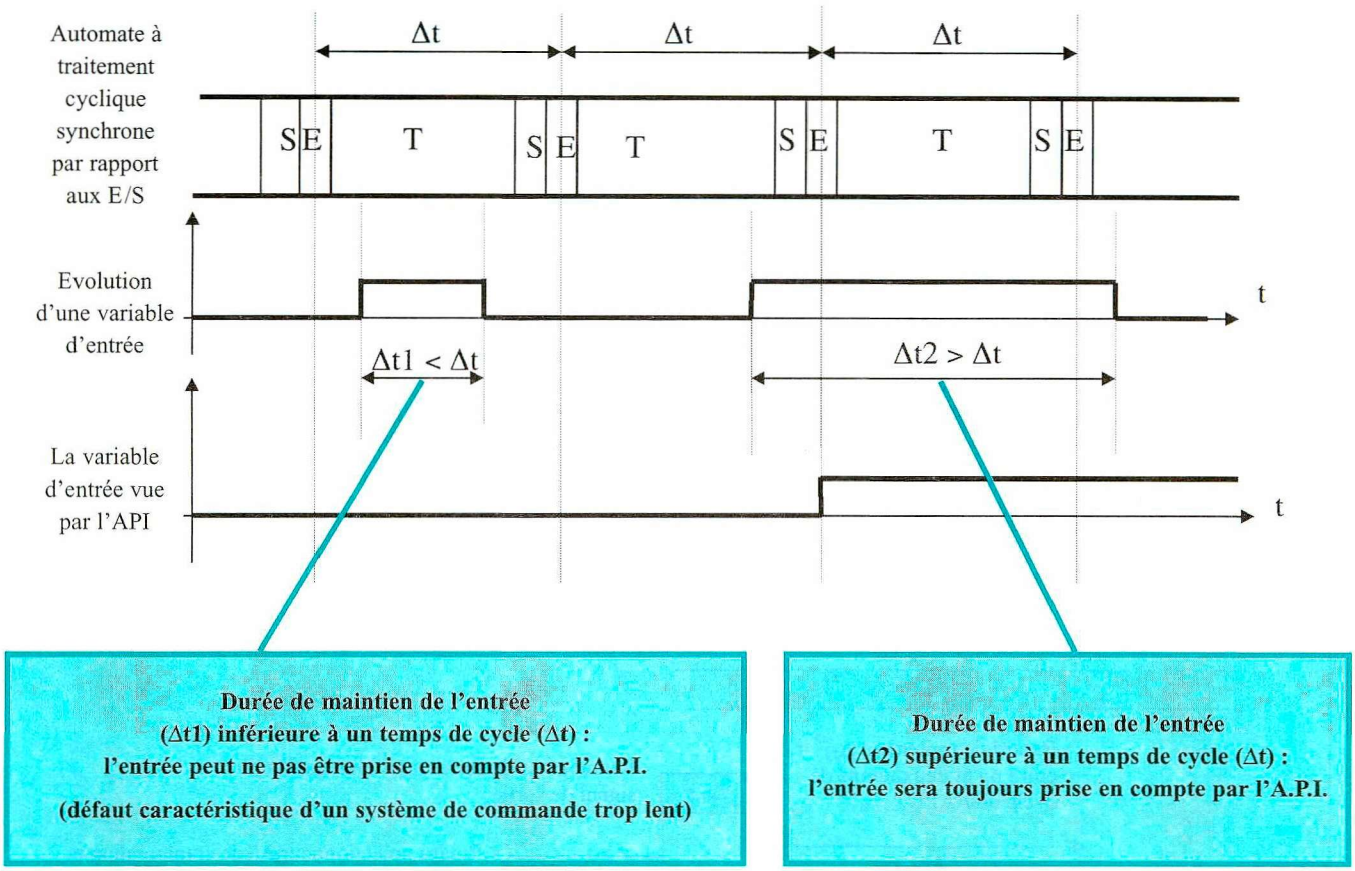


Figure 6-9 : problème de durée de maintien d'une entrée

On constate qu'à partir d'un programme, implanté sur un A.P.I., le fonctionnement réel du système est tributaire de la durée de maintien des variables d'entrées.
Ce phénomène est critique pour les traitements du Grafcet sur des A.P.I. à traitement cyclique par rapport aux E/S. En conséquence, on s'assurera que la durée de maintien des entrées est supérieure au temps de cycle (voir figure 6-9).

Pour des automates à traitement sur interruption on s'assurera que la fréquence d'apparition des entrées ne puisse pas générer une interruption pendant le traitement de l'interruption précédente (problème du masquage des interruptions) ; ce problème peut par exemple se poser lors du traitement d'une entrée rapide comme celle issue d'un codeur incrémental.

6.3.1.4. Conclusion

Le comportement d'une machine, qu'elle soit programmée en langage « orienté Grafcet » ou avec tout autre langage dépend des instants auxquels les informations d'entrée lui parviennent ainsi que de leur durée. Le danger est que le programmeur, et plus en amont le spécificateur, s'attend à obtenir un comportement unique de la machine décrit par son grafcet quel que soit le spectre d'évolution de ses entrées. Pire, il peut même être induit en erreur pensant que le modèle de l'application qu'il a écrite par grafcet peut résoudre le problème !

6.3.2. Par rapport au retard de causalité

Pour les problèmes de déterminisme évoqués dans le chapitre précédent, la causalité est à temps nul dans le modèle Grafcet, c'est-à-dire que l'effet induit par l'évolution d'une entrée sur une sortie se fait avec un retard nul à l'échelle du temps externe (figure 6-10).

Il est évident que les constituants (capteurs, actionneurs, pré-actionneurs, effecteurs, interfaces d'entrée et de sortie, ...) et le traitement programmé de la spécification Grafcet introduisent un retard de causalité [LES.93].

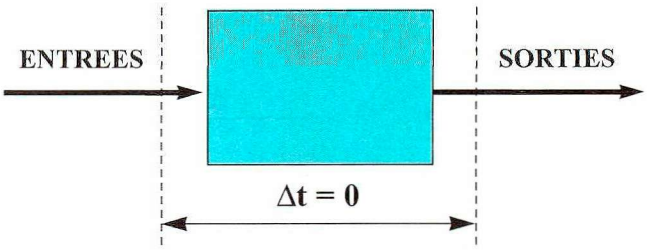


Figure 6-10 : causalité à temps nul

Ce retard peut être traduit par le diagramme de GANTT de la figure 6-11 suivante qui relie la cause à l'effet induit.

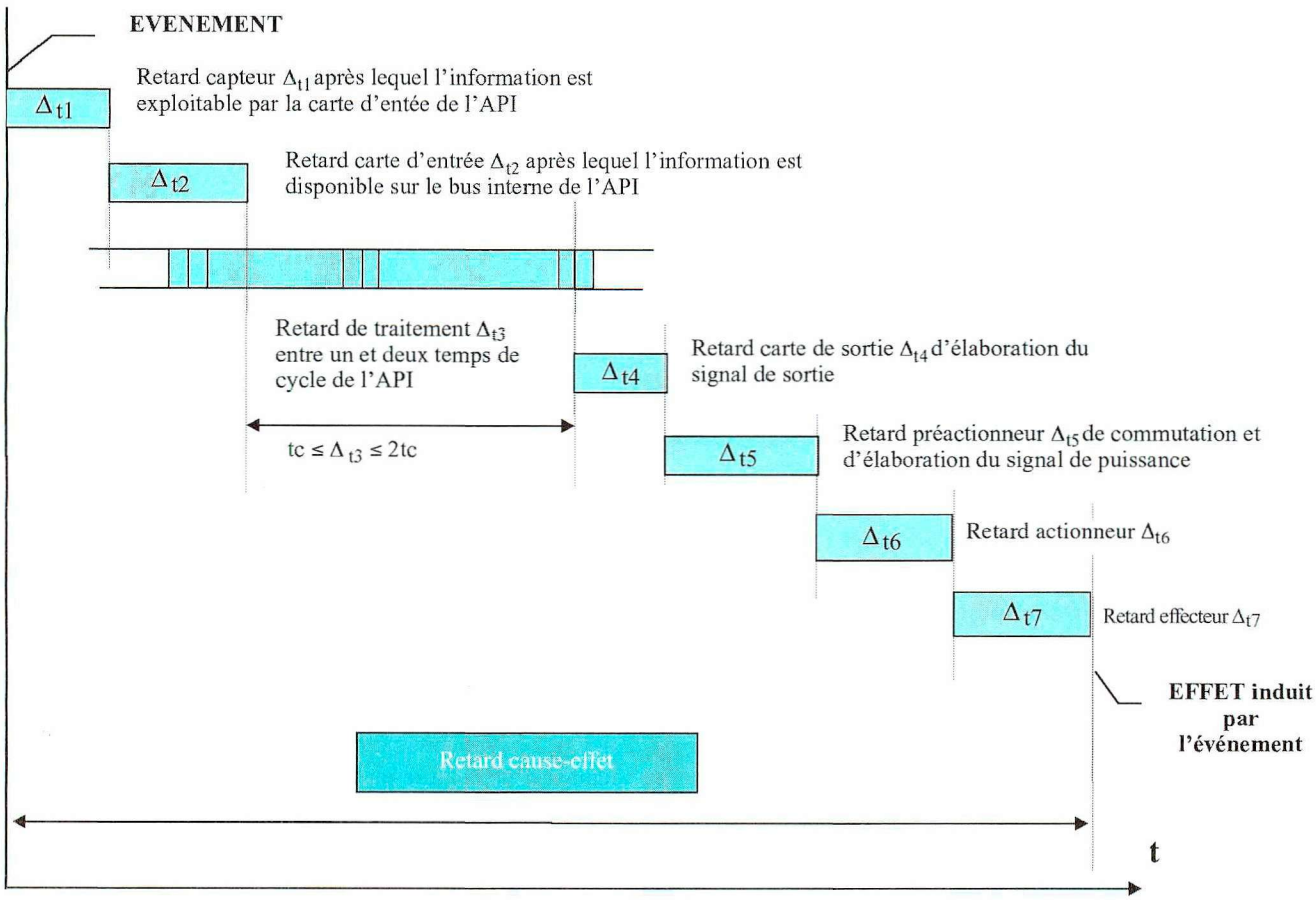


Figure 6-11 : retard de causalité

Une analyse du retard de causalité fait apparaître plusieurs sources de retard liées aux différents constituants de la chaîne fonctionnelle :

- Un retard Δ_{t1} lié au temps de « montée » du capteur qui traduit l'information source en une information image. Par exemple pour une cellule photoélectrique, un retard de 2 millisecondes est une valeur moyenne.
- Un retard Δ_{t2} lié à la carte d'entrée de l'A.P.I. (adaptation, filtrage du signal, traitement anti-rebond); ici un retard de 10 millisecondes est une valeur moyenne.
- Un retard Δ_{t3} lié au traitement de l'A.P.I. (traitement cyclique, traitement sur interruption); pour un traitement cyclique un temps de cycle de 5 à 10 millisecondes par KMOTS est une valeur moyenne.

Le cas représenté sur la figure 6-11 montre un retard de traitement pour un A.P.I. à traitement cyclique, celui ci a une valeur qui se situe entre 1 et 2 fois le temps de cycle.

- Un retard Δ_{t4} lié à l'élaboration du signal de sortie par la carte de l'A.P.I. (par exemple temps de commutation des relais). Ici un retard de 2 millisecondes est une valeur moyenne.
- Un retard Δ_{t5} lié à l'élaboration du signal de puissance par le préactionneur. Ici les temps de réponse des préactionneurs sont très variables selon leur technologie. Par exemple, pour un électro-distributeur pneumatique, une valeur moyenne peut être 20 millisecondes.
- Un retard Δ_{t6} lié à la mise en mouvement de l'actionneur essentiellement dû à des phénomènes d'inertie.
- Un retard Δ_{t7} lié à la mise en mouvement de l'effecteur (inertie).

6.3.3. Par rapport aux méthodes de programmation orientées Grafcet

Parmi les différents grafcets que nous aurons à implanter dans les parties commandes programmées nous pouvons faire une partition selon un critère de complexité :

- les grafcets qui nécessitent l'application des règles 1, 2, 3.
- les grafcets qui nécessitent l'application des règles 1, 2, 3, 4, 5.

Par ailleurs, l'algorithme de traitement du Grafcet pourra être avec ou sans recherche de stabilité.

Les méthodes d'implantation sont nombreuses (on notera par exemple les méthodes orientées « activation d'étapes », les méthodes orientées « franchissement de transition » [THE.80] ... associées à un algorithme avec ou sans recherche de stabilité) et s'adaptent plus ou moins bien aux grafcets définis ci-dessus.

En général, le résultat apparaît conforme à celui attendu par le modèle. Toutefois une distance entre le modèle et le réel existe obligatoirement, les causes de cette distance devant être connues du concepteur pour éviter des situations qui pourraient conduire à un dysfonctionnement de la P.C.

Evidemment, l'aspect temporel joue ici un rôle important surtout au niveau de la traduction des principes de synchronisme tels que ceux exprimés par les règles 3, 4 et 5.

Le concept de forçage est en général traduit par une organisation du programme qui favorise en premier lieu le traitement des grafcets de plus haut niveau hiérarchique.

Une attention particulière devra être accordée au problème de recherche ou de non recherche de stabilité. En effet, il y a le plus souvent opposition entre le modèle Grafcet qui tend à avoir un comportement interne conforme à une recherche de stabilité et le fonctionnement actuel de la majorité des A.P.I. dont les algorithmes de fonctionnement sont sans recherche de stabilité.

6.3.3.1. Les méthodes orientées « activation d'étape »

● *La méthode type « appel – réponse »*

Dans cette méthode, maintenant peu employée, on associe une variable d'état à chaque étape (figure 6-12a). Ces variables sont utilisées pour construire des fonctions mémoires à arrêt prioritaire (figure 6-12b).

L'appel : activation de Xi = MU

la réponse : désactivation de Xi = MZ . $\overline{MU}$

avec : MU = X_{i-1} . Condition 1 et : MZ = X_{i+1}

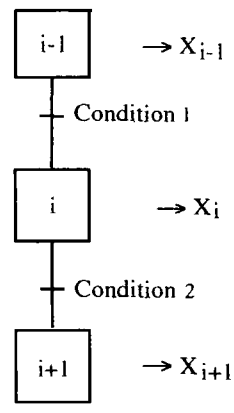


Figure 6-12a : exemple de grafcet

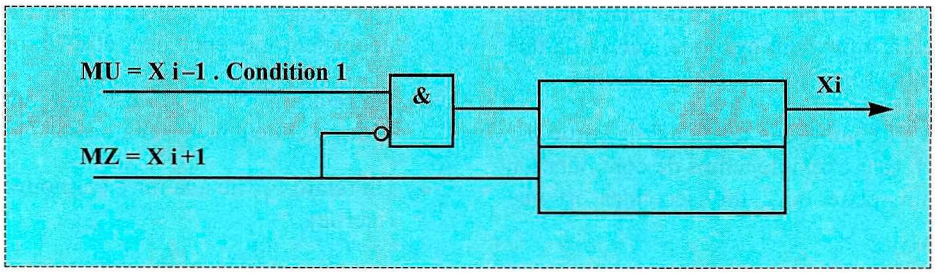


Figure 6-12b : méthode de type appel-réponse

Il est évident que cette méthode introduit une grande distance modèle – réel :

- priorité à la désactivation d'étape (non conforme à la règle 5),
- activation et désactivation non simultanées des étapes d'entrée et de sortie de transition (non conforme à la règle 3),
- simultanéité de franchissement de transition impossible dans cette méthode par essence asynchrone (non conforme à la règle 4).

● *La méthode par « équation d'activité » ou « activation / désactivation » [GRE.85] :*

Cette méthode est issue d'une interprétation algébrique de l'évolution entre les situations d'un grafcet :

- soit le vecteur des variables d'entrée : { E (t) } = { .....e_i (t)..... } représentant l'état des variables d'entrée e_i à un instant t,
- soit le vecteur d'état : { X (t) } = { .....Xn(t).....} représentant l'état des étapes Xn à un instant t, pour l'application d'une algèbre booléenne, on prend, par convention :
  - Xn (t) = 0 si l'étape n est inactive,
  - Xn (t) = 1 si l'étape n est active.

La situation d'un grafcet à un instant t est définie par le vecteur d'état de toutes les étapes à cet instant t.

On peut ainsi donner une formulation générale des équations d'activité des étapes :

En appelant : n l'étape que l'on analyse,
p les transitions d'entrée de l'étape n notées p_j,
s les transitions de sortie de l'étape n notées s_k,

- $Xn(t) = Cpn + Xn\,(t-1) \,.\, \overline{Cns}$
- $X1(t) = Cp1 + X1 \,.\, \overline{C1s}$

Avec $Cpn = \sum CF\,(p_j)$: réunion des conditions de franchissement de toutes les transitions p_j amonts reliées à l'étape n

et $Cns = \sum CF\,(s_k)$: réunion des conditions de franchissement des transitions s_k avales reliées à l'étape n.

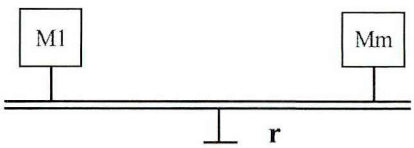


Figure 6-13 : exemple de grafcet illustrant la méthode par équation d'activité

La condition de franchissement CF(t) d'une transition (t), de réceptivité r, validée par m étapes Ml s'exprime algébriquement par : $CF\,(t) = (\,X_{M1} \,.\, X_{M2} \,.\, \ldots\ldots X_{Mm}) \,.\, r = \prod_{i=1}^{m} (\,X_{Mi}\,) \,.\, r$

6.3.3.2. Les méthodes orientées « franchissement de transition »

L'une des méthodes peut être représentée sur la figure 6-14. On évalue globalement tous les franchissements de transition, pour actualiser la situation du grafcet.

La distance entre le modèle et le réel réside ici essentiellement sur la non simultanéité d'évolution pendant le traitement.

En effet si le Grafcet impose une simultanéité d'évolution, le traitement par des constituants programmables, par essence séquentiel, ne permet pas d'assurer le franchissement simultané de transitions simultanément franchissables.

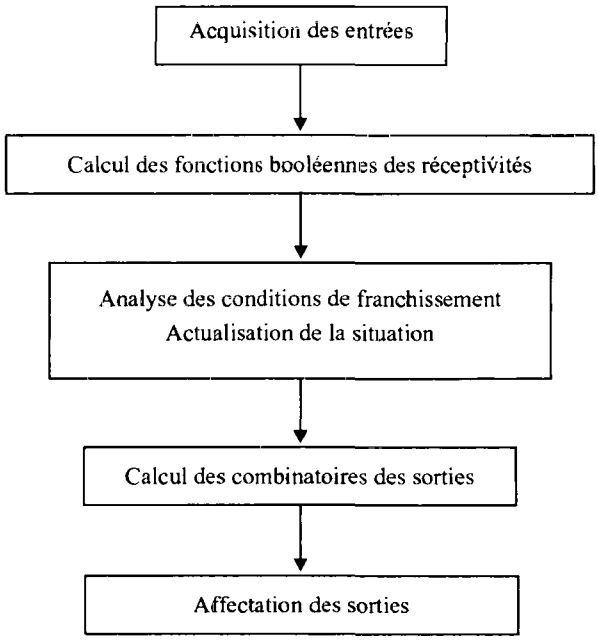


Figure 6-14 : méthode orientée franchissement de transition

6.3.4. Par rapport à la recherche ou la non recherche de stabilité

6.3.4.1. Analyse du comportement théorique d'un grafcet

Lorsque l'hypothèse fondamentale liée à l'existence de deux échelles des temps (voir paragraphe 2.3.3.) est respectée, le modèle théorique Grafcet a un comportement parfaitement déterministe.

En effet, un événement externe est pris en compte avec toutes ses conséquences sur l'évolution du grafcet avant l'apparition d'un nouvel événement externe. Ces deux événements peuvent survenir avec un intervalle de temps infiniment petit, intervalle pris dans l'échelle de temps réel du système physique (échelle de temps externe au Grafcet).

La durée d'évolution de la situation du grafcet (échelle de temps interne au Grafcet) est une durée théorique qui ne peut pas être mesurée, donc incomparable avec l'échelle de temps réel. On sait seulement qu'elle sera toujours plus rapide que n'importe quel intervalle de temps réel.

A partir de la situation (1, 3), identifiée sur la figure 6-15, les changements d'état des variables a, b et c (représentant trois événements extérieurs non corrélés) ne peuvent pas se produire à la même date externe si l'hypothèse fondamentale est respectée.

Les apparitions successives de a, puis b, puis c séparés par des intervalles de temps infiniment petits conduiront toujours, d'après le modèle théorique, à la situation (7) (voir figure 6-16).

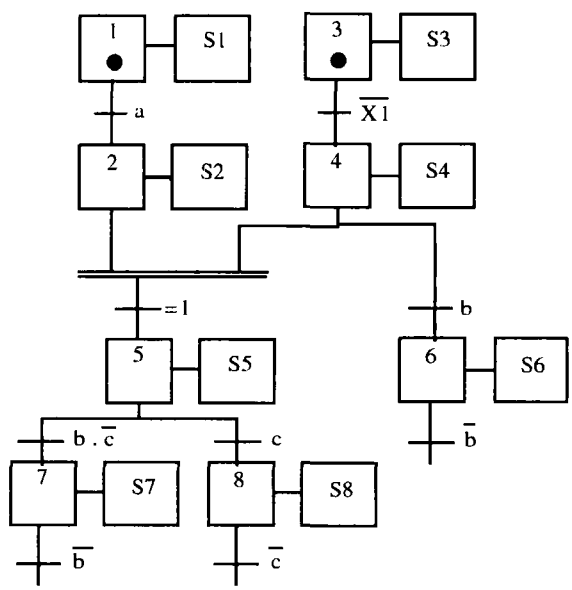


Figure 6-15 : exemple de grafcet pris dans une situation donnée

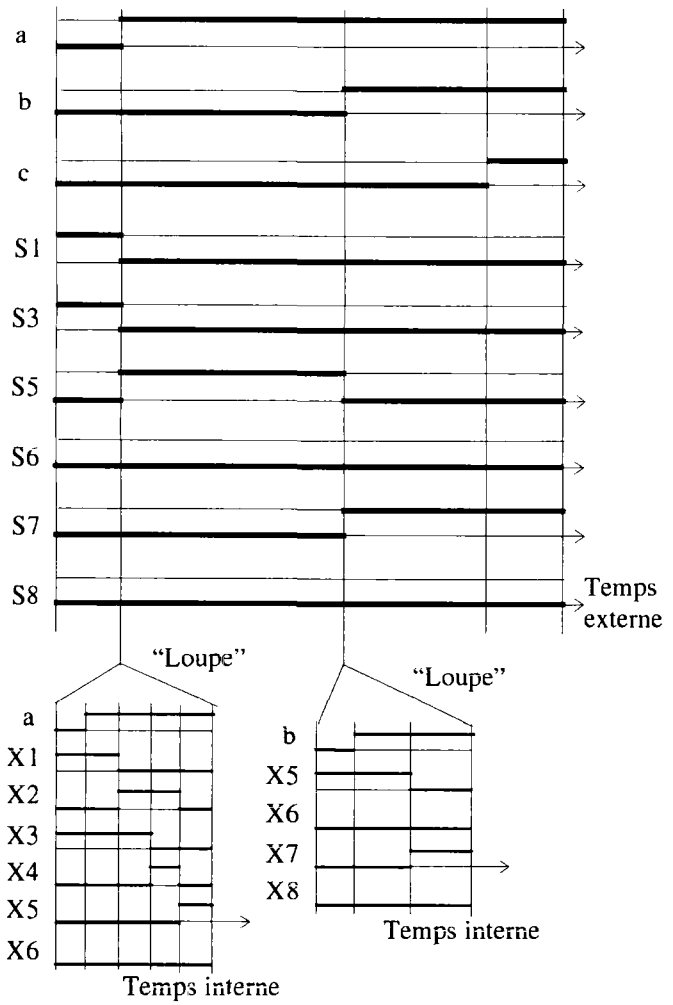


Figure 6-16 : évolution attendue par le modèle théorique

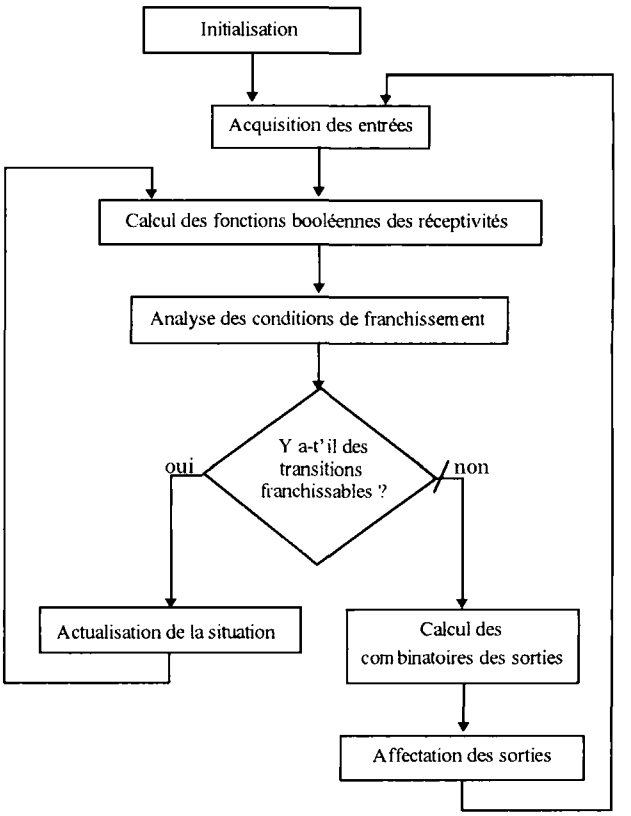


Figure 6-17 : algorithme avec recherche de stabilité

6.3.4.2. Analyse du comportement réel d'une machine

La machine programmée qui traduit un tel comportement théorique n'existe pas. En effet, il lui faut un certain temps pour produire une évolution de situation (temps de mise à « 1 » de bits internes images des activités d'étapes, temps de calcul des fonctions combinatoires, ...). Cette durée n'est pas négligeable même pour des processeurs très rapides.

En 1983, encore sous l'égide de l'AFCET, le goupe de travail « GRAFCET » a proposé deux algorithmes d'interprétation du Grafcet, en vue de son implantation [MON.83] :

- un algorithme avec recherche de stabilité – ARS – (voir figure 6-17),
- un algorithme sans recherche de stabilité – SRS – (voir figure 6-18).

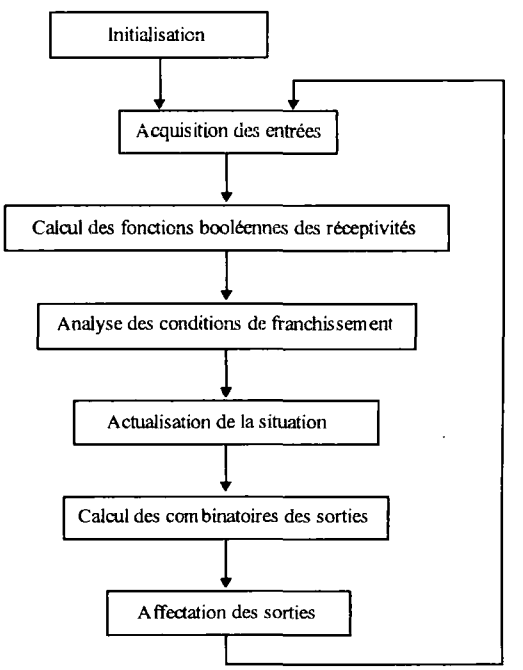


Figure 6-18 : algorithme sans recherche de stabilité

Dans le cas, grandement majoritaire, où deux événements distincts consécutifs surviennent avec un intervalle de temps Δt suffisant, et que le nombre d'évolutions conduit à une durée de traitement t_T faible, le comportement de la machine sera conforme à celui attendu par le modèle de spécification, car $\Delta t > t_T$. C'est-à-dire que toutes les évolutions, consécutives à un événement, seront terminées avant l'apparition d'un nouvel événement. Les deux algorithmes ne présentent alors pas de différence de comportement.

Les chronogrammes des figures 6-19 et 6-20 considèrent le cas contraire où b apparait juste après a, de telle sorte que b est présent avant la fin de traitement consécutif à l'apparition de a. Il peut donc influer l'évolution du graphe selon l'algorithme choisi.

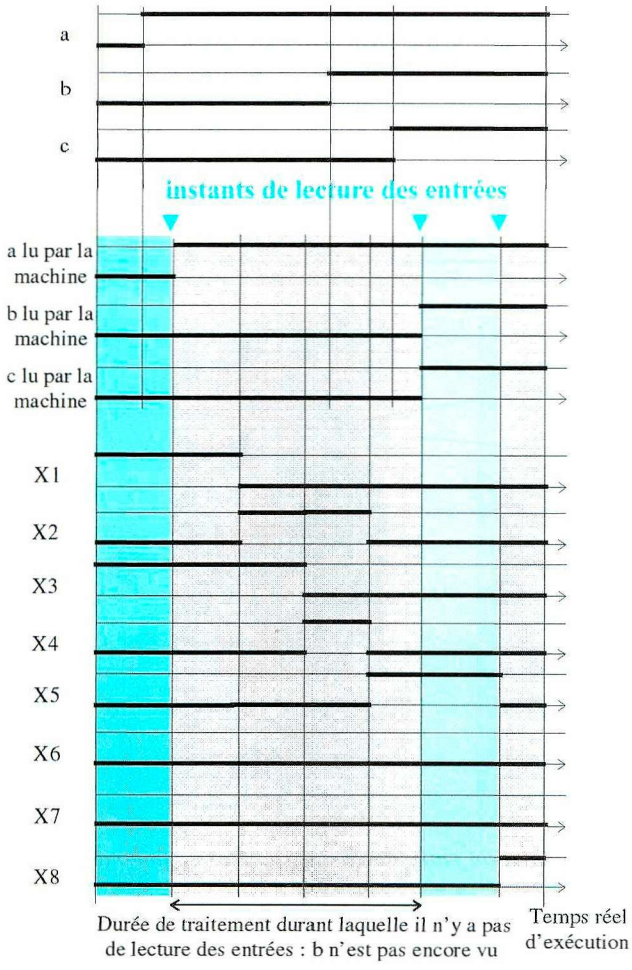


Figure 6-19 : évolution avec algorithme ARS

Avec l'algorithme avec recherche de stabilité le comportement observé (voir figure 6-19), est proche de celui attendu par la description Grafcet parce qu'il nous conduit à la situation (5) ; cependant, une nouvelle lecture des entrées nous amène à considérer b et c vrais simultanément ce qui nous fait atteindre la situation (8).

Par contre, la figure 6-20 relative à l'algorithme sans recherche de stabilité (qui est implantanté sur la majorité des A.P.I. sur le marché) montre que l'on est conduit à une situation (5,6) incohérente avec le comportement théorique, puis une autre situation (6,8) après lecture de l'entrée c.

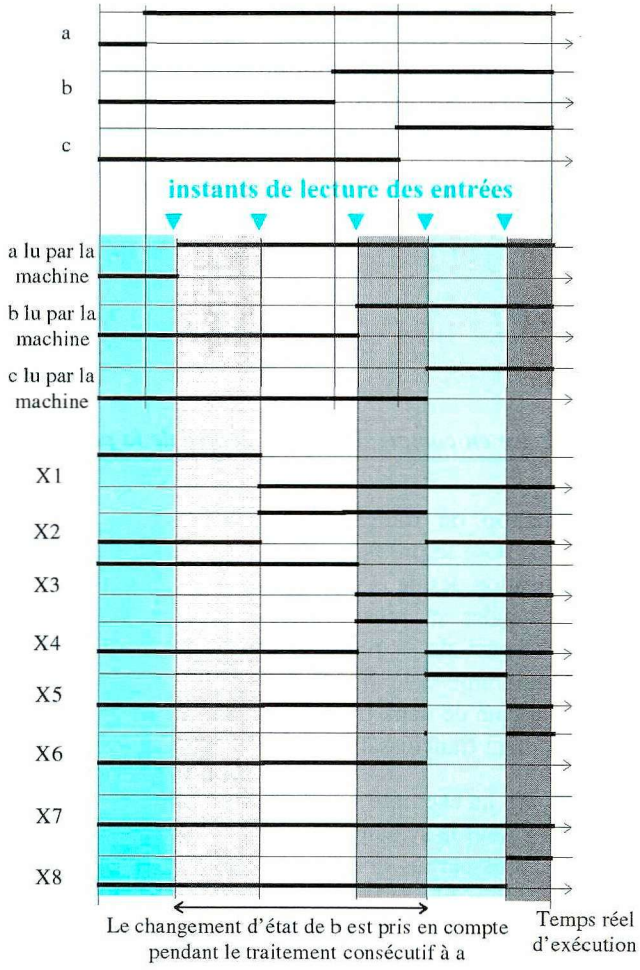


Figure 6-20 : évolution avec algorithme SRS

En conclusion, les deux algorithmes conduisent à des comportements différents, mais aucun ne satisfait le comportement du modèle théorique.

Il faut remarquer qu'aucune des méthodes exposées précédemment ne permet d'intégrer le concept de forçage. Les techniques d'implantation de ces ordres de forçage ne sont pas abordées dans ce chapitre.

6.3.5. Par rapport à la répartition du traitement sur plusieurs unités de commandes

6.3.5.1. Spécification sans prise en compte de l'architecture de la partie commande

Soient les grafcets de la figure 6-16 représentés sous deux formes : l'un avec le parallélisme exprimé sous une forme structurale, l'autre avec le parallélisme exprimé sous une forme interprétée. Ces deux grafcets traduisent le même cahier des charges.
Le choix d'une partie commande distribuée sur plusieurs unités de commandes peut nous conduire à exploiter le grafcet sous la forme interprétée avec une répartition qui consiste à distribuer le traitement sur deux A.P.I.

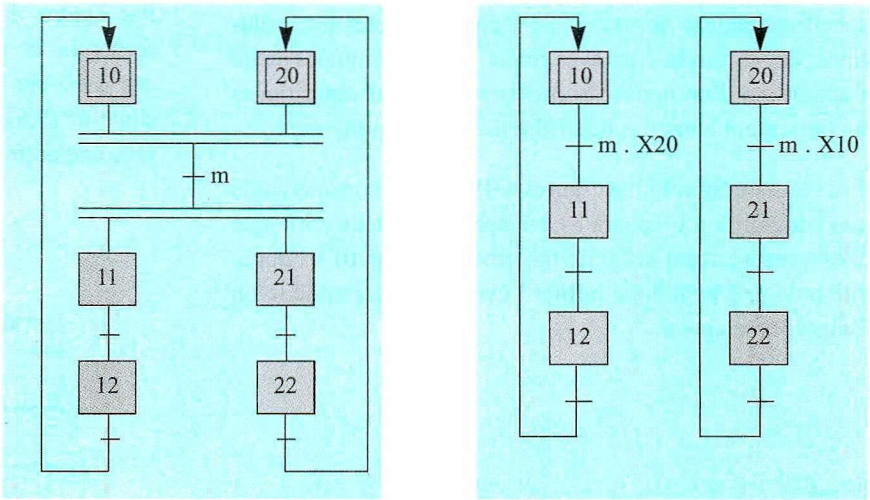


Figure 6-16 : exemple de grafcets équivalents

6.3.5.2. Prise en compte de l'architecture de la partie commande

L'implantation du traitement sur deux A.P.I. pose le problème de la synchronisation des deux sous-parties commandes et plus précisément le respect de la règle 4 du Grafcet qui impose le franchissement simultané de deux transitions simultanément franchissables.

Pour prendre un exemple simple, si l'on adopte pour la synchronisation des deux sous-parties commandes une liaison fil à fil par les entrées/sorties des A.P.I., nous allons implanter le modèle présenté sur la figure 6-17.

La communication entre les deux sous-parties commandes se fera par S10 et S20 images des états des étapes 10 et 20. Le même schéma s'applique pour une communication au travers d'un réseau, qu'il soit hétérogène ou non.

Nous faisons l'hypothèse que les temps de propagation des signaux sont nuls.

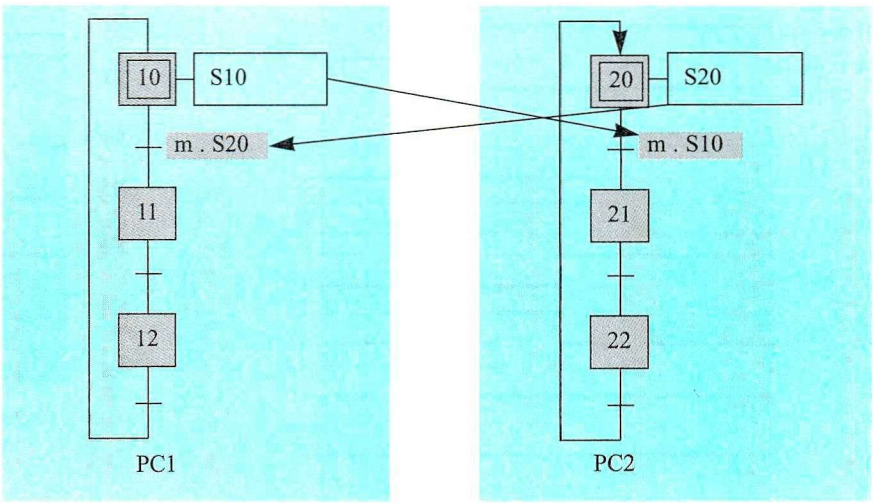


Figure 6-17 : communication entre deux sous-parties commandes

6.3.5.3. Comportement attendu dans le cas d'une partie commande répartie

Nous avons vu précédemment que la prise en compte d'une entrée, dans un A.P.I. à traitement cyclique, ne peut être garantie que si elle est maintenue au moins un temps de cycle.

Or, les cycles des différentes parties commandes sont désynchronisées et de durées différentes comme le montre le chronogramme de la figure 6-18.

Cycle P.C.1 : traduit le fonctionnement cyclique de la partie commande P.C.1 (mémorisation des entrées, traitement, mise à jour des sorties).

Cycle P.C.2 : traduit le fonctionnement cyclique de la partie commande P.C.2.

m : variable logique.

S10 : sortie image de l'état de X10. La variable S10 est mise à jour lors de la phase de mise à jour des sorties.

S20 : sortie image de l'état de X20.

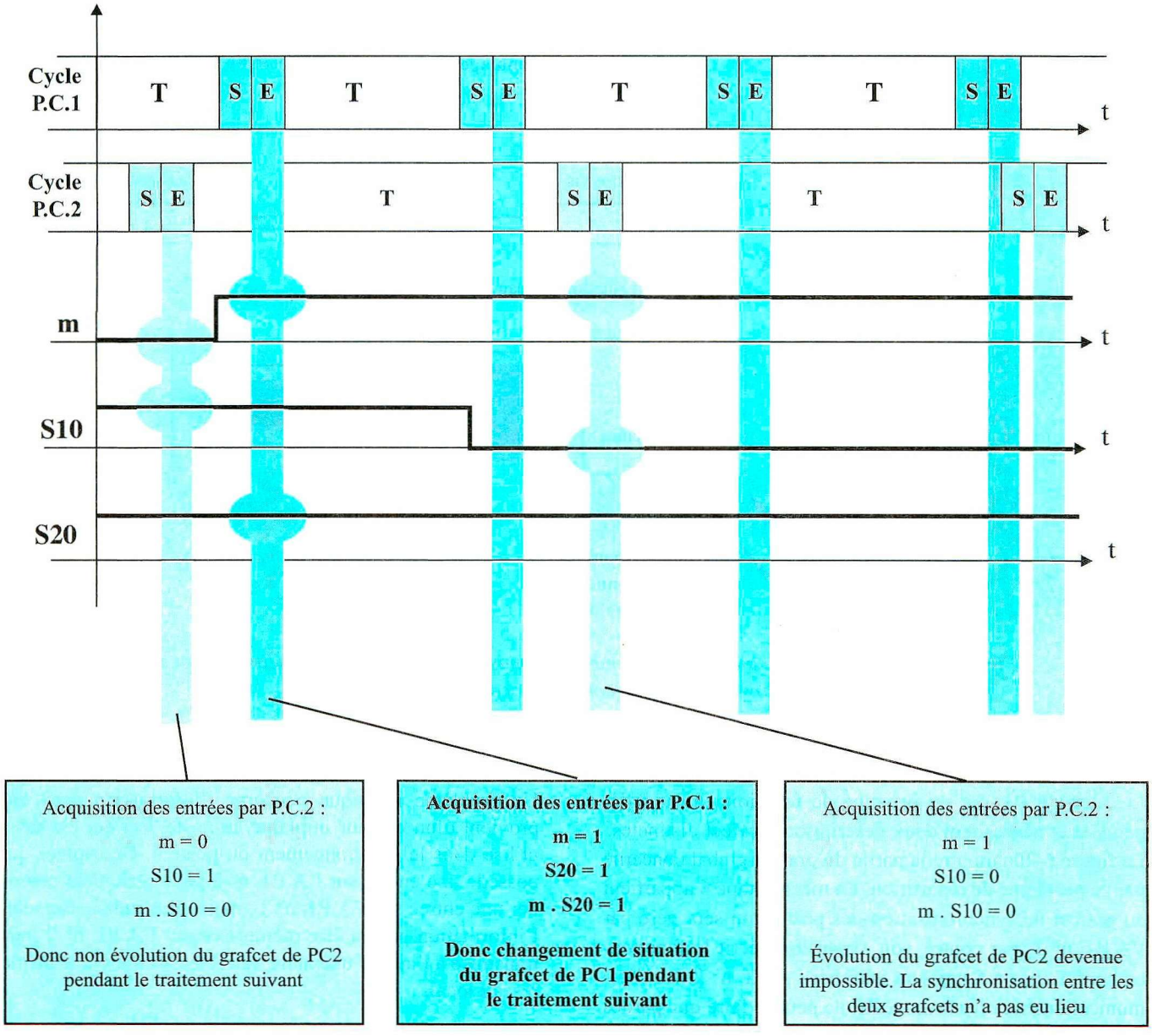


Figure 6-18 : problème de synchronisation de l'information entre deux parties commandes

Dans ce cas, le grafcet traité par P.C.2 n'évolue pas. L'aléa vient d'une évolution plus rapide et d'une désynchronisation du cycle de P.C.1 par rapport à celui de P.C.2.

Cela se traduit par une évolution de S10 avant que l'acquisition de cette information soit réalisée par le cycle de P.C.2.

6.3.5.4. Exemple lié à l'application n° 1

Le grafcet global de fonctionnement de la machine, présenté dans l'application n° 1, est constitué de plusieurs grafcets, dont certains sont synchronisés par des variables d'étape Xi. Les expansions des macro-étapes 1, 2, 3, 4, 5 et 6 sont des séquences qui appartiennent au même grafcet, puisque l'on peut les mettre en lieu et place des macro-étapes correspondantes.

La machine à assembler les masses comporte deux unités de commande : deux automates programmables industriels reliés par un réseau local (voir figure 6-19). Le premier A.P.I. commande le sous-ensemble d'assemblage constitué par les postes n° 1, 2, 3, 4 et 5 et leur synchronisation, alors que le second A.P.I. gère les postes n° 6 et 7 de conditionnement sur les palettes.

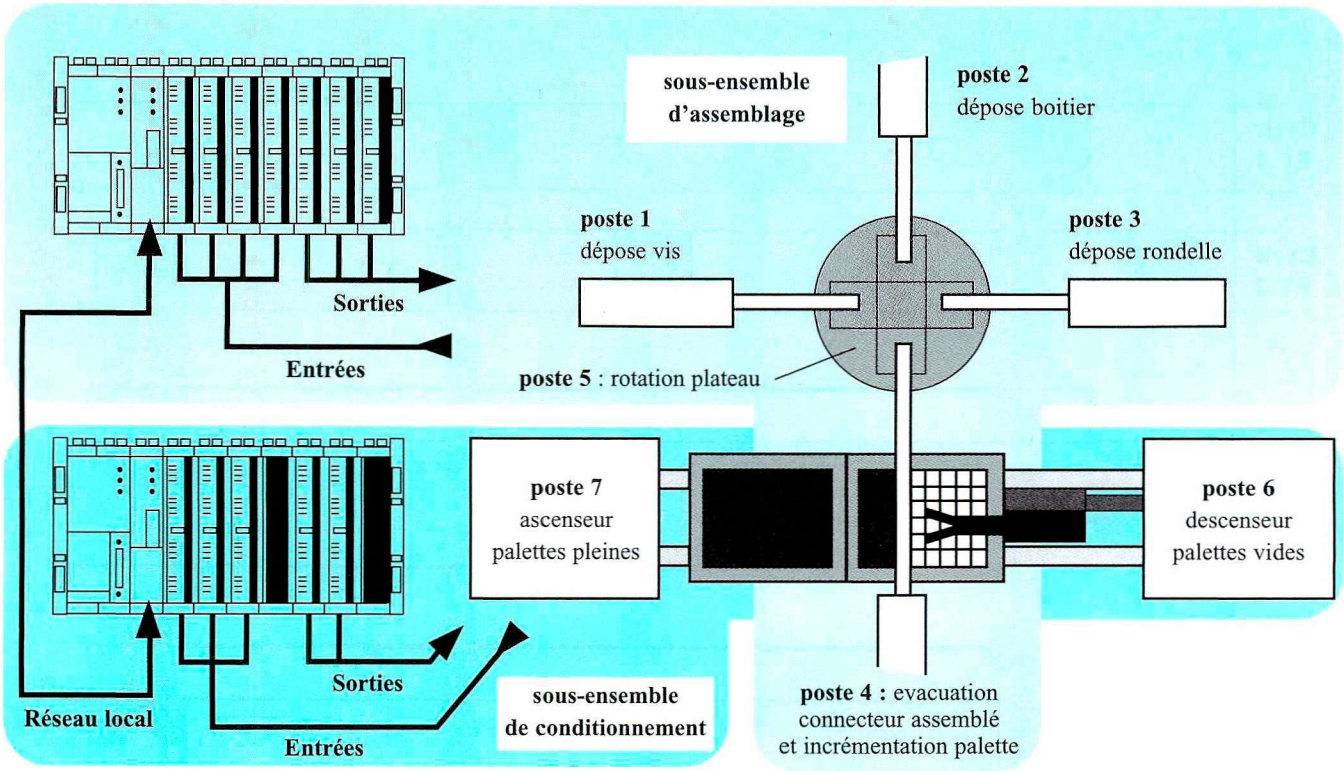


Figure 6-19 : partage de la machine à assembler les masses imposant une répartition du grafcet dans les unités de commande correspondantes

Les deux A.P.I. ont un principe de fonctionnement indépendant et nécessitent deux descriptions grafcet distinctes. La figure 6-20a montre la partie du grafcet global concerné par ce problème de répartition. La macro-étape 6 appartient au grafcet de synchronisation des postes qui sera géré par l'A.P.I. n° 1, par contre, son expansion décrit le fonctionnement du poste 6 qui sera géré par l'A.P.I. n° 2. La communication entre les deux A.P.I. ne peut se faire que par les variables externes VE1 et VE2 qui apparaissent sur la figure 6-20b.

Un problème identique concerne l'information pae7 qui provient d'un capteur implanté au poste 7 et qui est aussi utilisé dans le fonctionnement du poste 4. Ce capteur qui possède une entrée sur l'A.P.I. n° 2 peut également posséder une entrée sur l'A.P.I. n° 1 ; mais, plus judicieusement, l'information pourra être mémorisée par l'A.P.I. n° 2 puis transmise à l'aide d'une autre variable externe via le même réseau local.

Dans tous ces cas précis, il n'y a pas de conséquence majeure sur le fonctionnement du système.

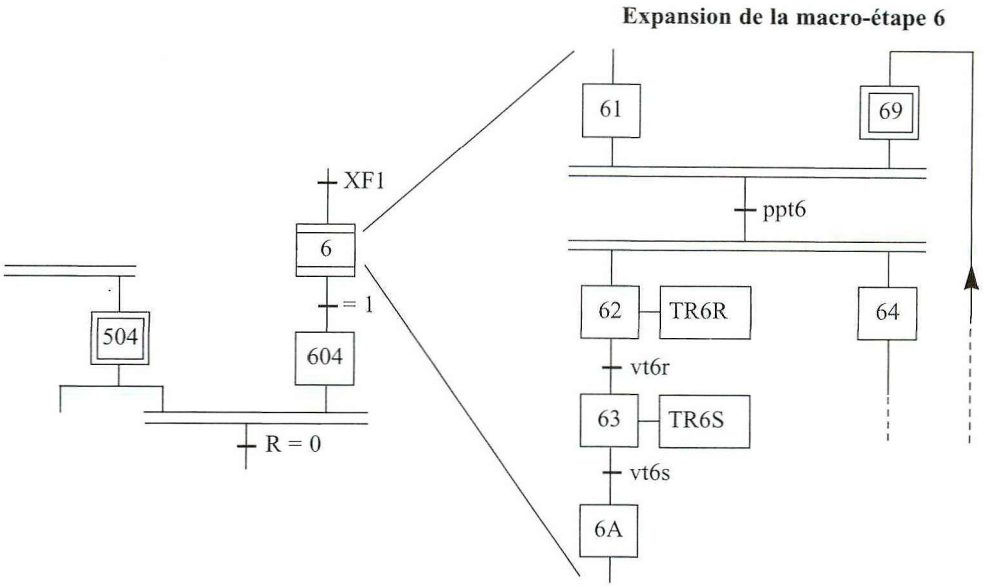


Figure 6-20a : grafcet global ne supposant aucune répartition.

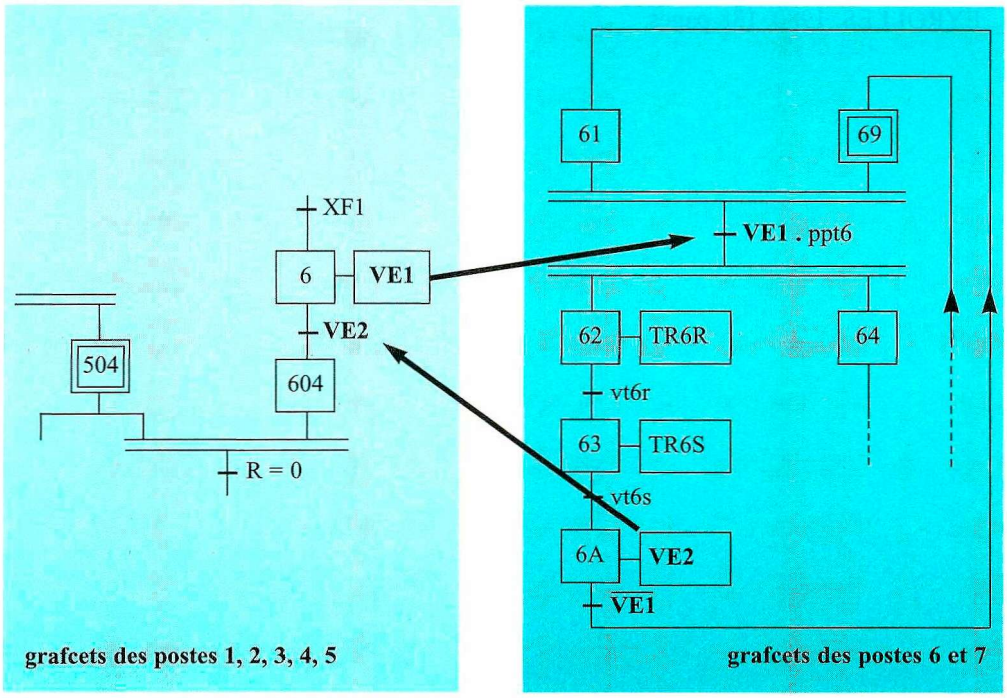


Figure 6-20b : utilisation de variables externes pour la synchronisation des A.P.I.

6.4. Mise en garde concernant l'implantation

La lecture des chapitres précédents nous a permis de voir que le Grafcet est un outil de modélisation remarquable et puissant. Cependant, il n'est pas là pour résoudre tous les problèmes, en particulier ceux concernant l'implantation du programme et le fonctionnement du système.

La traduction d'un grafcet dans un des langages de programmation, la prise en compte du comportement de la machine cible, et en allant plus loin sa fiabilité et son comportement sur défaut, sont autant de difficultés à résoudre pour l'automaticien, avant d'être sûr que son système réagisse de manière correcte et déterministe.

6.5. Références bibliographiques

[DUM.97] « Atelier logiciel d'A.P.I. : la norme CEI 1131 » J.J. DUMERY, Revue Technologies et Formations n° 69, Janvier 1997, pages 19 à 24;

[FAU.92] « Implantation d'une commande spécifiée à l'aide de l'outil de modélisation GRAFCET », J.M. FAURE, Université d'Eté 1993 – ENS de CACHAN, 8 au 13 Juillet 1993, pages 95 à 108;

[G7W.92] « Le GRAFCET », Groupe G7W – ADEPA/AFCET, CEPADUES Editions, Collection Automatisation et Production, 1992, 144 pages;

[GRE.85] « Le GRAFCET : de nouveaux concepts », GREPA, CEPADUES Editions, Collection Automatisation et Production, Décembre 1985, 104 pages;

[LES.93] « Caractérisation du comportement temporel d'un Automate Programmable Industriel », J.J. LESAGE, Université d'Eté 1993 – ENS de CACHAN, 8 au 13 Juillet 1993, pages 73 à 86;

[MER.97] « Automatique », C. MERLAUD, Cours du CNED, préparation à l'agrégation externe de génie mécanique;

[NFE.93] « Automates programmables – Partie 3 : Langages de programmation », Norme Française et Norme Européenne NF EN 61131-3, CENELEC; Version française de la norme CEI/IEC 1131-3, Juillet 1993, 202 pages;

[THE.80] « GRAFCET et logique industrielle programmée » S. THELLIEZ et J.M. TOULOTTE, Editions EYROLLES, 1980, 138 pages.

CHAPITRE 7

APPLICATIONS

CHAPITRE 7
APPLICATIONS

7.1. Application n° 1 : machine à assembler les masses

7.1.1. Composition générale de la machine

Cet exemple d'application est un système industriel automatisé à processus discontinu. La machine a été conçue au CIPES avec la collaboration d'AUTOMOBILES PEUGEOT pour l'usine de carrosserie du centre de production de SOCHAUX. C'est une machine automatique à assembler et conditionner des connecteurs de masse électrique.

Ce produit est composé de trois éléments (voir figure 7-1) : un boîtier sur lequel sont placés une vis autotaraudeuse et une rondelle frein. Ce produit ainsi constitué et conditionné sur des palettes est utilisé sur une chaîne de montage où un opérateur saisit la vis par la partie filetée, la place sur une boulonneuse, puis fixe l'ensemble sur la carrosserie.

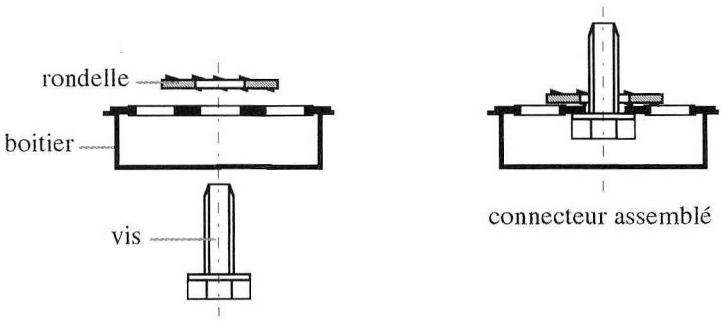


Figure 7-1 : connecteur de masse électrique

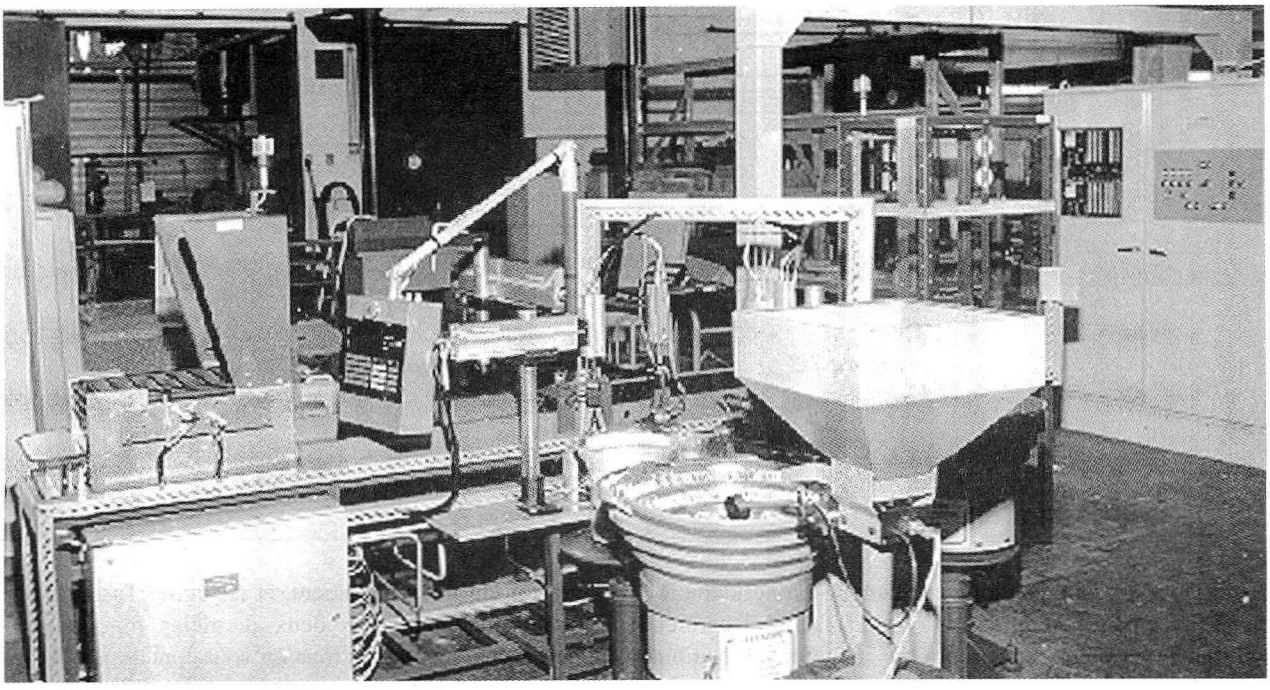


Figure 7-2 : vue d'ensemble de la machine

La machine, servant à assembler ces éléments et dont une photographie générale est donnée figure 7-2, est composée de deux sous-ensembles distincts (voir figure 7-3) : un sous-système d'assemblage du produit composé des postes 1, 2, 3, 4, 5 et d'un sous-système de conditionnement de ce produit sur des palettes, qui comporte les postes 6 et 7. Ce découpage est issu d'une analyse fonctionnelle dont on peut identifier quelques éléments dans le chapitre « éléments de construction d'un grafcet ».

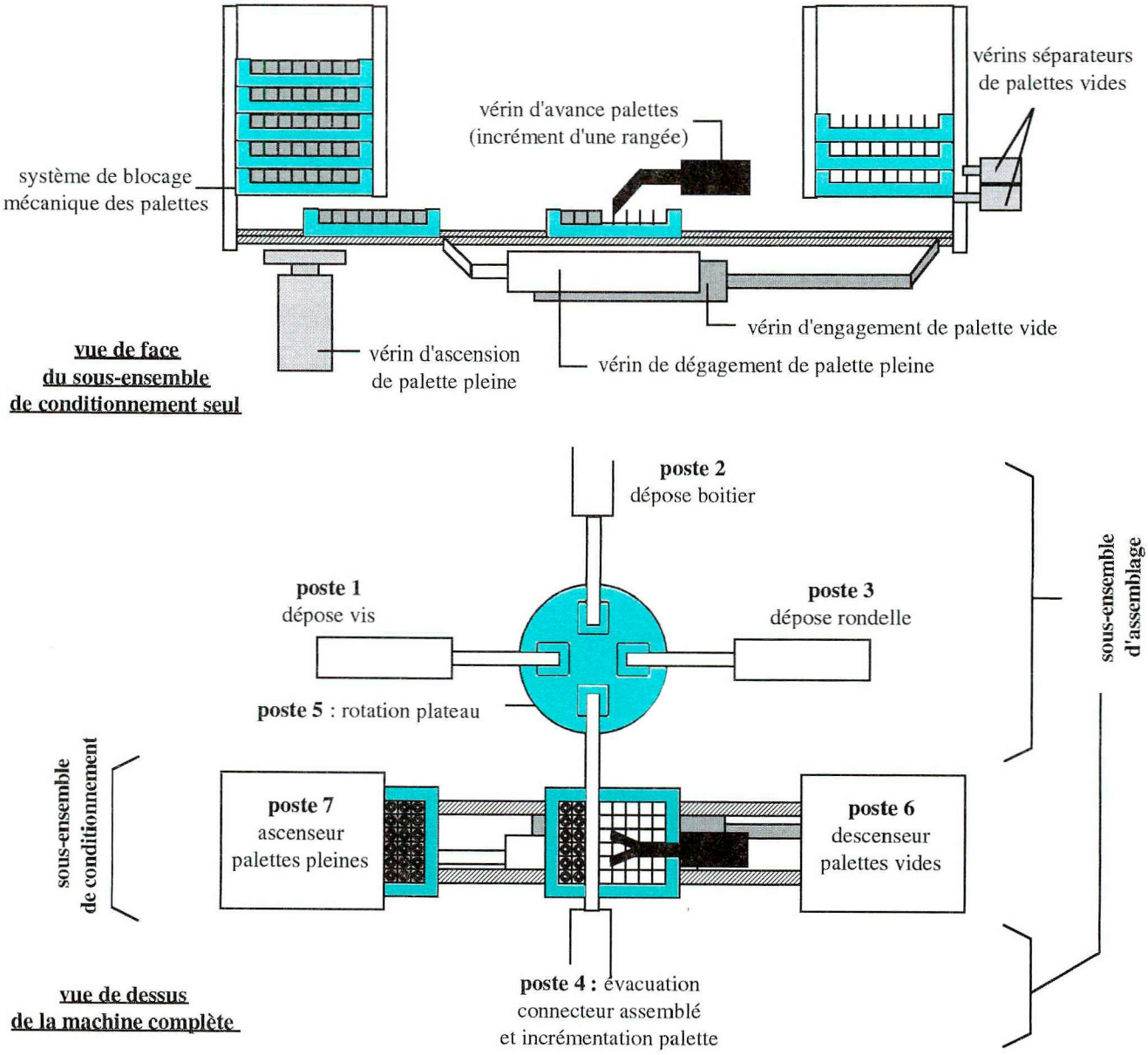
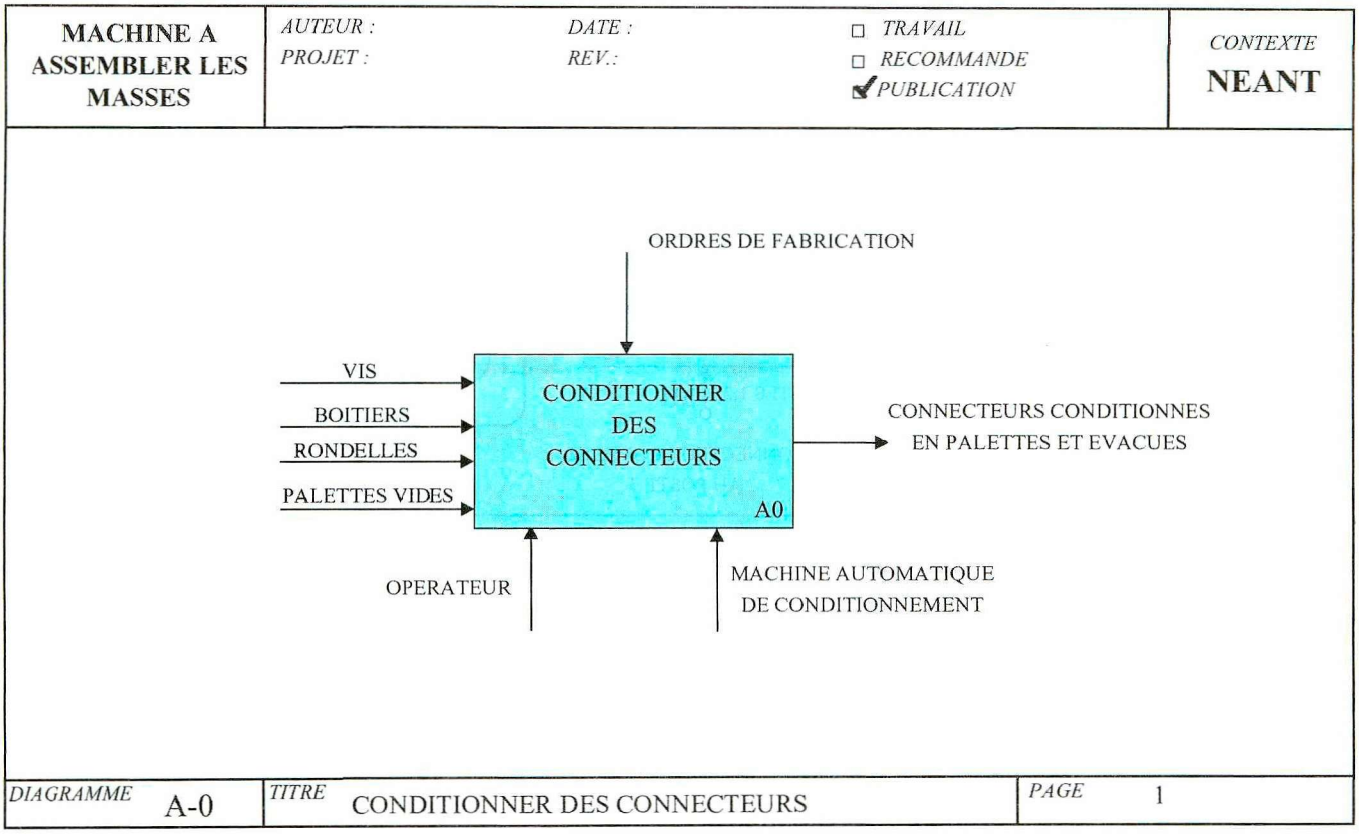


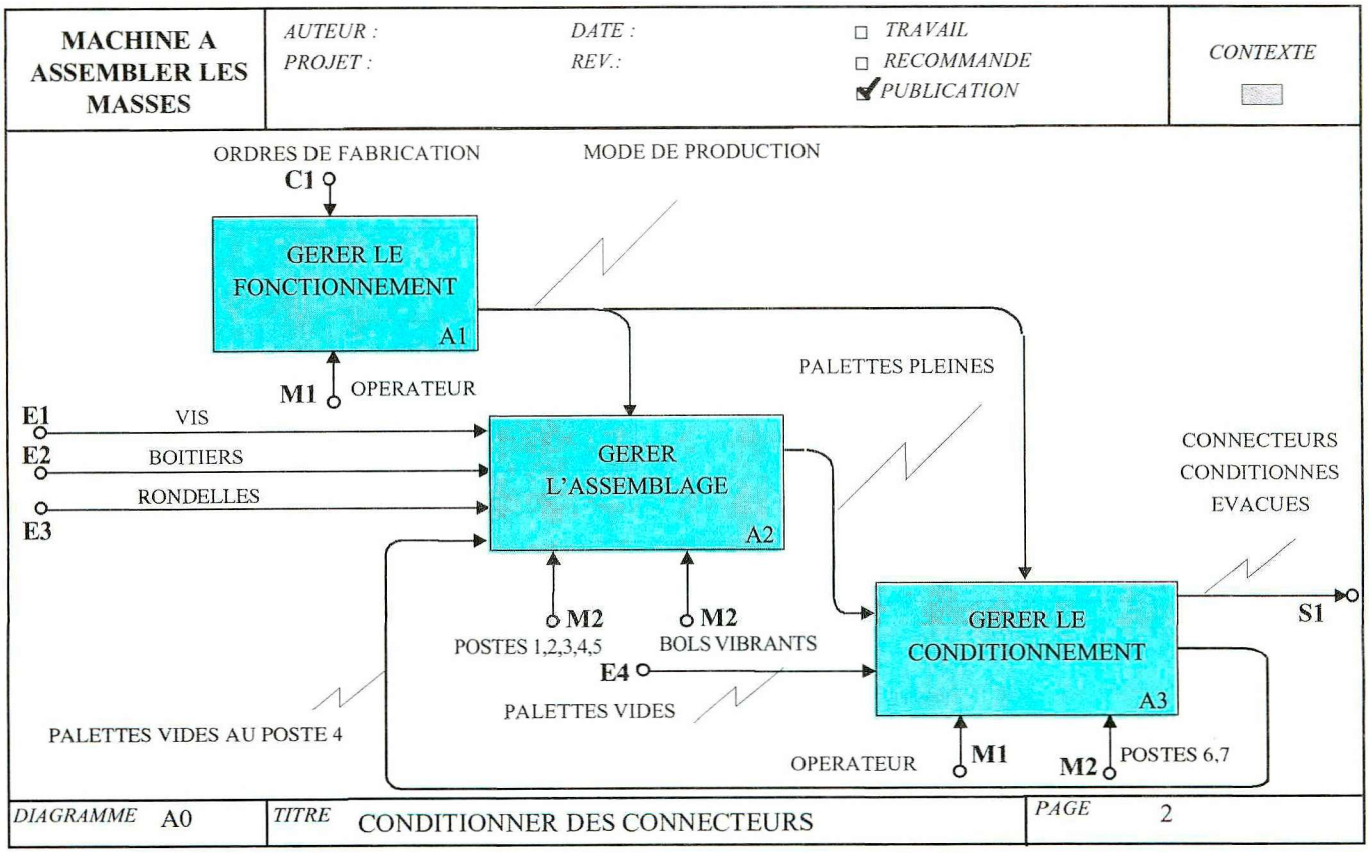
Figure 7-3 : représentation simplifiée de la machine

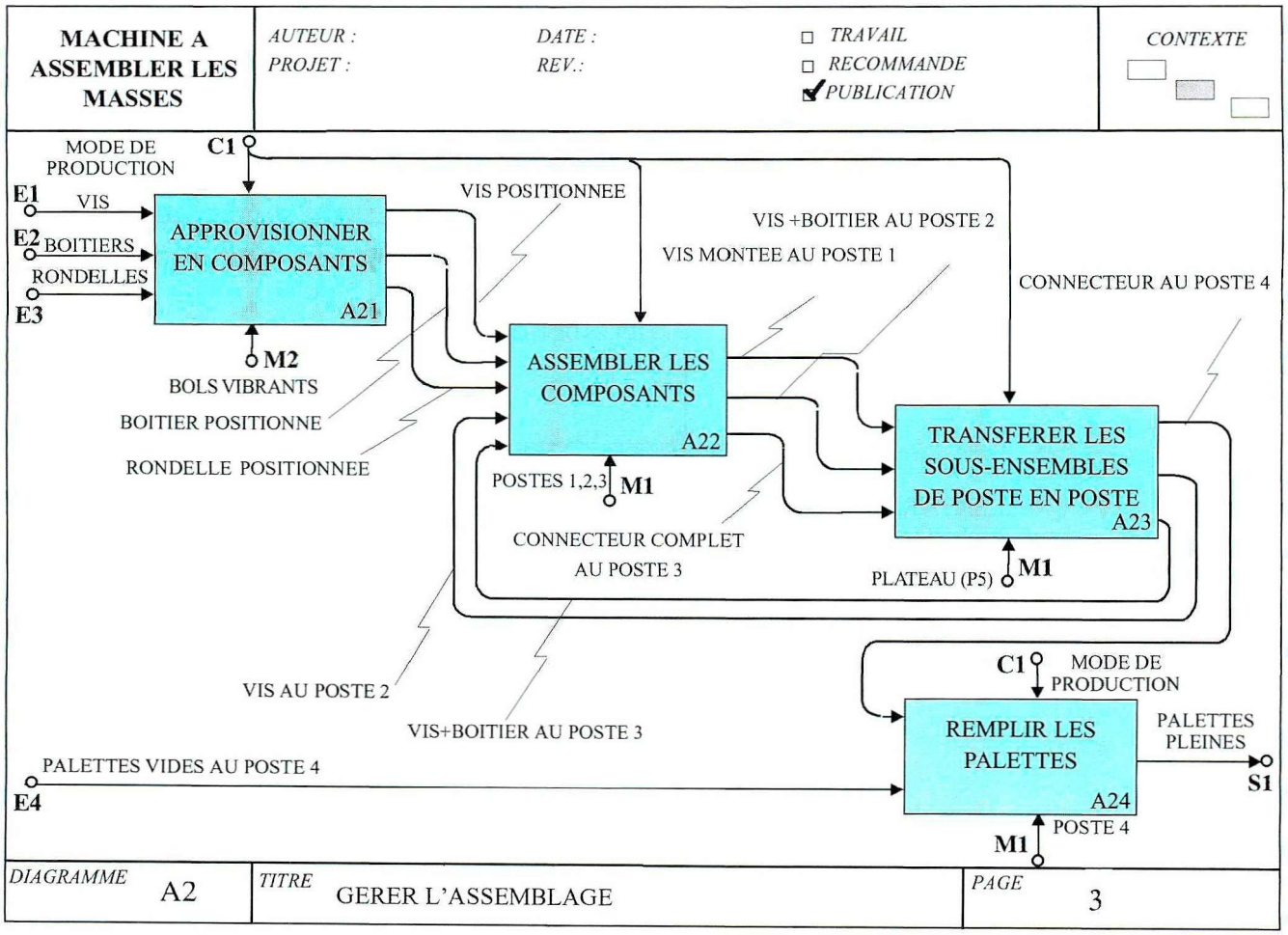
7.1.2. Description fonctionnelle

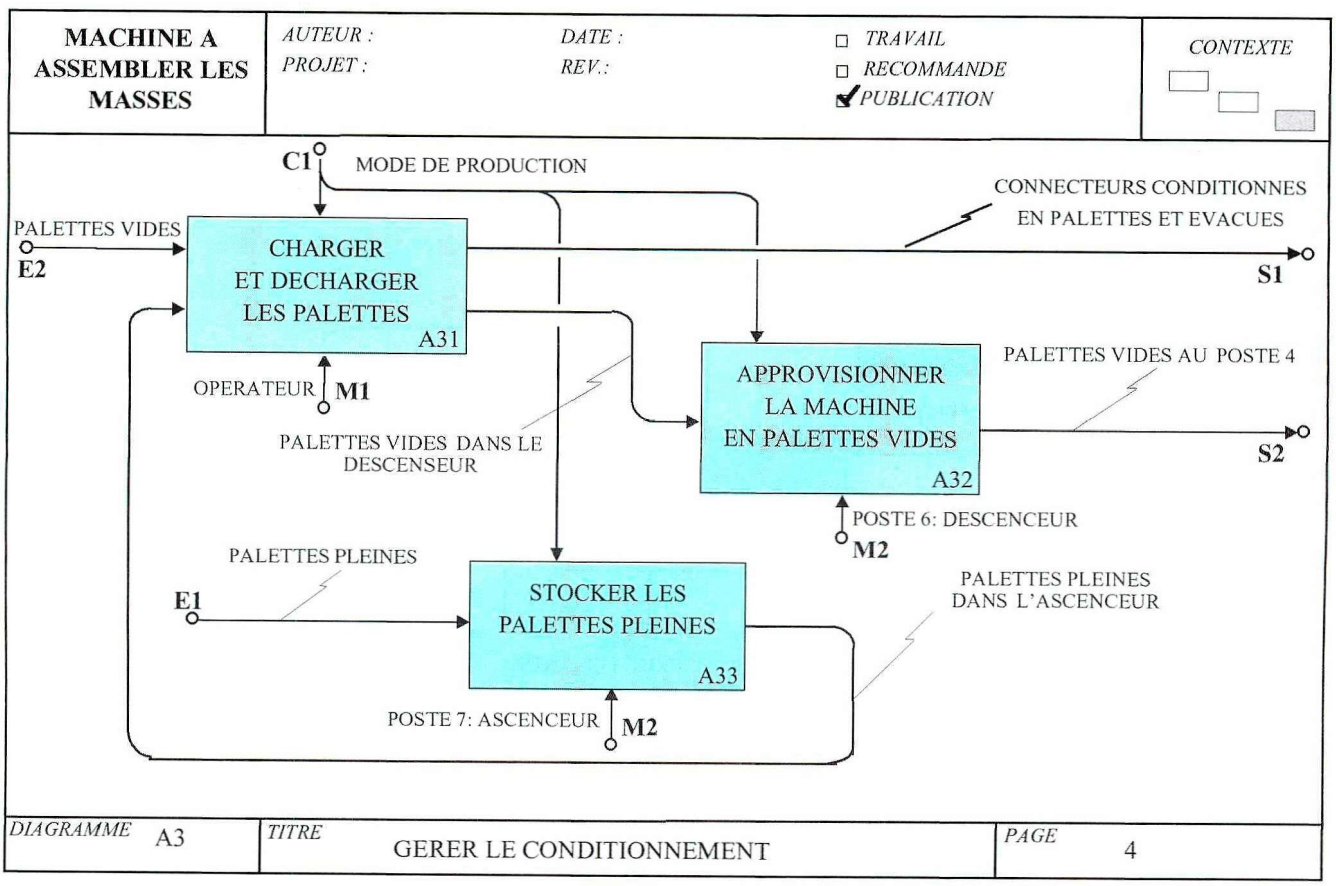
Le paragraphe suivant développe une analyse fonctionnelle effectuée avec l'outil de modélisation SADT. SADT permet d'analyser le système en proposant une décomposition fonctionnelle structurée. Cette analyse fait apparaître trois fonctions principales (diagramme A0), l'une concernant la gestion du fonctionnement, et les autres l'assemblage et le conditionnement. Les deux dernières fonctions donnent lieu à des décompositions en sous-fonctions (diagrammes A2, A3 et A22).

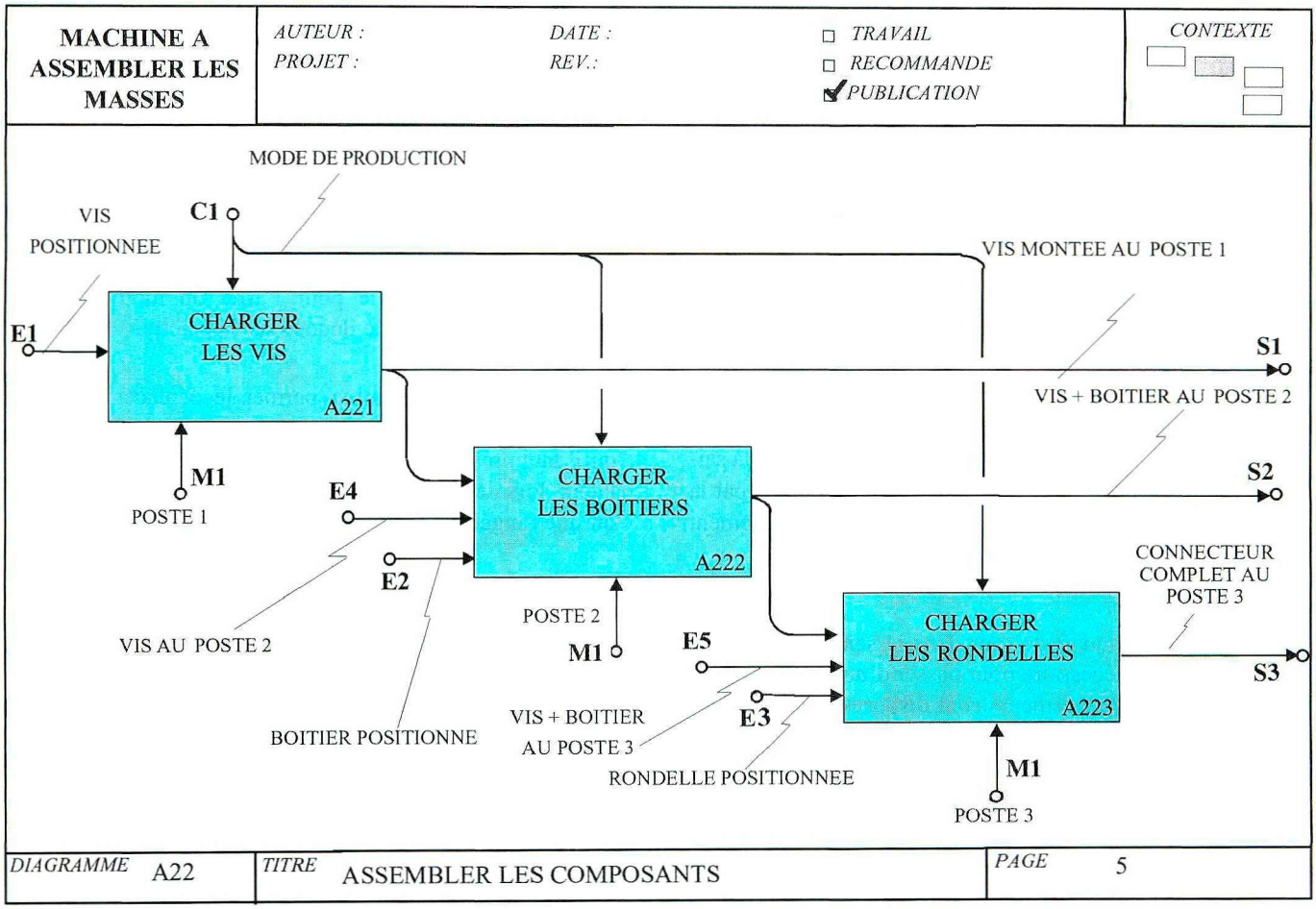
7.1.2.1. Analyse fonctionnelle SADT de la machine à assembler les masses






MACHINE A ASSEMBLER LES MASSES
AUTEUR :
PROJET :
DATE :
REV.:
TRAVAIL
RECOMMANDE
PUBLICATION
CONTEXTE
MODE DE PRODUCTION
C1
E1
VIS
E2
BOITIERS
RONDELLES
E3
APPROVISIONNER EN COMPOSANTS
A21
M2
BOLS VIBRANTS
BOITIER POSITIONNE
RONDELLE POSITIONNEE
VIS POSITIONNEE
VIS +BOITIER AU POSTE 2
VIS MONTEE AU POSTE 1
CONNECTEUR AU POSTE 4
ASSEMBLER LES COMPOSANTS
A22
POSTES 1,2,3
M1
CONNECTEUR COMPLET AU POSTE 3
TRANSFERER LES SOUS-ENSEMBLES DE POSTE EN POSTE
A23
PLATEAU (P5)
M1
VIS AU POSTE 2
VIS+BOITIER AU POSTE 3
C1
MODE DE PRODUCTION
REMPLIR LES PALETTES
A24
PALETTES PLEINES
S1
PALETTES VIDES AU POSTE 4
E4
M1
POSTE 4
DIAGRAMME
A2
TITRE
GERER L'ASSEMBLAGE
PAGE
3


MACHINE A ASSEMBLER LES MASSES
AUTEUR :
PROJET :
DATE :
REV.:
TRAVAIL
RECOMMANDE
PUBLICATION
CONTEXTE
C1
MODE DE PRODUCTION
CONNECTEURS CONDITIONNES EN PALETTES ET EVACUES
PALETTES VIDES
E2
CHARGER ET DECHARGER LES PALETTES
A31
S1
OPERATEUR
M1
APPROVISIONNER LA MACHINE EN PALETTES VIDES
A32
PALETTES VIDES AU POSTE 4
S2
PALETTES VIDES DANS LE DESCENSEUR
POSTE 6: DESCENCEUR
M2
PALETTES PLEINES
E1
STOCKER LES PALETTES PLEINES
A33
PALETTES PLEINES DANS L'ASCENCEUR
POSTE 7: ASCENCEUR
M2
DIAGRAMME
A3
TITRE
GERER LE CONDITIONNEMENT
PAGE
4



Les deux paragraphes suivants présentent l'organisation structurelle de la machine à partir de cette analyse fonctionnelle. Elle fait apparaître les constitutions des différents postes permettant de supporter les fonctions précédemment identifiées.

Enfin, la suite du chapitre considère le fonctionnement des différents postes et utilise le Grafcet comme outil de représentation du comportement dynamique, modélisation qui ne peut être faite avec SADT. On voit bien ici l'intérêt de chacun des deux outils utilisés conjointement, le premier (SADT) servant à structurer l'application en différentes fonctions et le second (Grafcet) à décrire ainsi plus facilement le fonctionnement.

7.1.2.2. Sous-système d'assemblage

● Poste 1 : dépose d'une vis

Une vis est prise dans une zone de stockage puis est déposée sur le plateau tournant, dans l'emplacement prévu. Ce poste comporte :

- un bol vibrant assurant le stockage et le tri de vis (son fonctionnement est continu et sa commande est indépendante de l'étude abordée ici),
- une goulotte d'amenée approvisionnant en vis depuis le bol vibrant,
- un tiroir permettant la sélection d'une vis et sa présentation pour le transfert sur le plateau,
- un manipulateur comportant une unité verticale de translation terminé par un préhenseur et une unité horizontale de translation assurant le transfert de la vis, du tiroir au plateau. L'emplacement du plateau dans lequel on vient déposer la vis est vide.

● Poste 2 : dépose d'un boîtier

Un boîtier est pris dans une zone de stockage puis est déposé sur le plateau tournant, dans l'emplacement prévu. Des éléments identiques à ceux du poste 1 sont utilisés pour ce transfert. L'emplacement du plateau dans lequel on vient déposer le boîtier contient déjà une vis, déposée au poste précédent.

● Poste 3 : dépose d'une rondelle

Une rondelle est prise dans une zone de stockage puis est déposée sur le plateau tournant, dans l'emplacement prévu. Des éléments identiques à ceux du poste 1 sont utilisés pour ce transfert.

L'emplacement du plateau dans lequel on vient déposer la rondelle contient déjà une vis et un boîtier, déposés aux deux postes précédents.

● Poste 4 : évacuation du connecteur

Le connecteur assemblé est pris sur le plateau, puis rangé dans un casier vide d'une palette. Pour cela, on utilise un manipulateur comportant un mouvement vertical, un mouvement horizontal qui lui permet d'atteindre 7 positions (une au-dessus du plateau tournant et les autres au-dessus de la palette) et une pince à son extrémité permettant la saisie de la vis. Le positionnement horizontal est obtenu par la combinaison d'un vérin pneumatique pour le déplacement et d'un frein électrique pour l'arrêt du mouvement au regard d'une position de dépose sur la palette.

Un vérin d'incrémentation permet le déplacement de la palette d'une rangée. Ce déplacement est nécessaire lorsqu'il faut présenter une rangée vide à la dépose du manipulateur, lors de l'engagement d'une nouvelle palette ou lorsqu'une rangée est pleine de connecteurs.

● Poste 5 : rotation du plateau

Une rotation d'un quart de tour dans le sens des aiguilles d'une montre est nécessaire pour passer d'un poste au poste suivant. Quatre emplacements sont disposés sur le plateau tournant : un emplacement vide au poste 1, un second possédant déjà une vis au poste 2, un troisième comportant une vis et un boîtier au poste 3, et enfin un dernier dans lequel se trouve un connecteur complet, prêt à être évacué. L'emplacement situé en face du poste 4 libéré par l'évacuation du connecteur se retrouve, après rotation, en face du poste 1 et prêt à accueillir une vis.

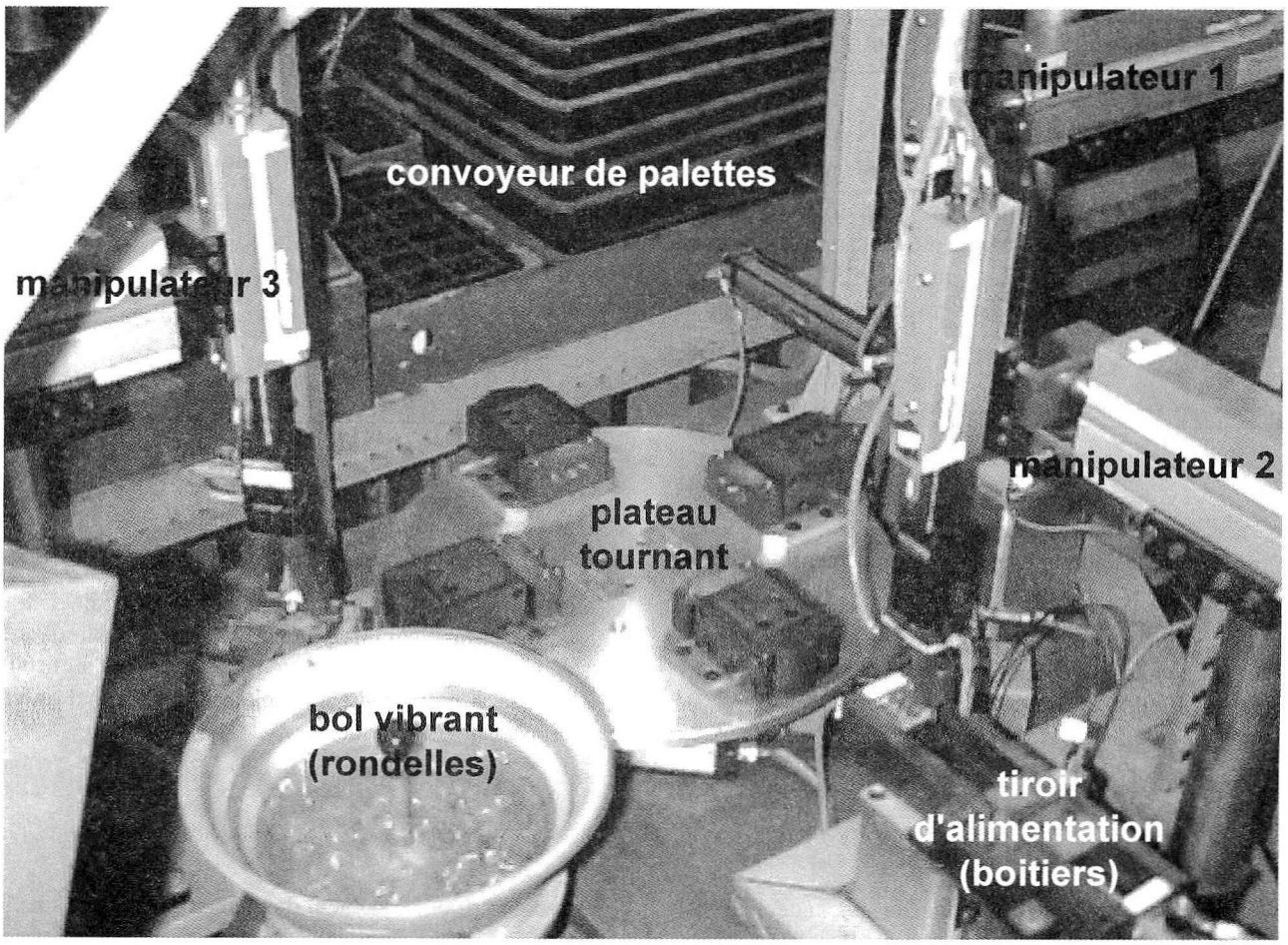


Figure 7-4 : vue du sous-ensemble d'assemblage

7.1.2.3. Sous-système de conditionnement

● Poste 6 : descenseur de palette

Il assure l'approvisionnement automatique en palettes vides. Dès qu'une palette est demandée au poste d'assemblage, le descenseur libère, par gravité, une nouvelle palette vide, isolée de la pile par un système séparateur. Puis, un vérin d'engagement de palette vide tire cette nouvelle palette par sa partie inférieure jusqu'au poste 4.

Si le niveau de palettes dans le magasin atteint un seuil bas, une alarme prévient l'opérateur. Ce dernier assure alors l'approvisionnement manuel de palettes. En cas de non approvisionnement, la production se poursuit jusqu'à ce qu'il n'y ait plus de casiers disponibles pour recevoir les connecteurs, puis la machine s'arrête.

● Poste 7 : ascenseur de palette

Il permet l'évacuation des palettes pleines. Le dégagement d'une palette pleine se fait dans un premier temps par poussée de la palette en cours de chargement, puis est pris en charge par un vérin de dégagement de palette pleine, qui l'emmène jusqu'à l'ascenseur. Dès qu'elle parvient à l'ascenseur, un vérin monte cette palette jusqu'à un seuil d'accrochage mécanique. L'accès à une nouvelle palette pleine est alors autorisée.

Lorsque le niveau de palettes dans le magasin atteint un seuil haut, une alarme est déclenchée pour prévenir l'opérateur. Celui-ci assure le déchargement de la pile ainsi constituée. En cas d'engorgement du magasin, la production se poursuit jusqu'à saturation complète de la chaîne.

7.1.3. Fonctionnement du poste 1

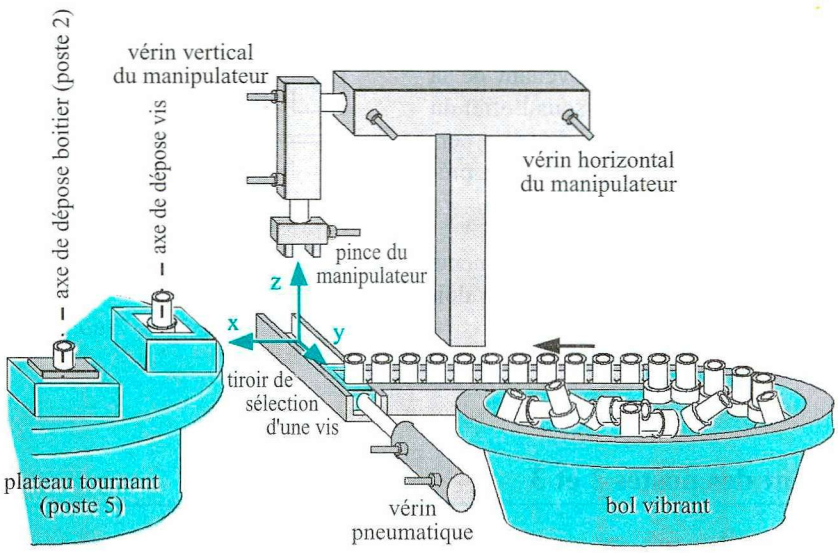


Figure 7-5 : schéma d'implantation du poste 1

La figure 7-5 montre l'implantation du poste 1, avec le manipulateur qui comporte trois actionneurs : un vérin de translation horizontale, un vérin de translation verticale et un préhenseur de type pince. Un bol vibrant, dont l'actionneur n'est pas représenté, stocke plusieurs centaines de vis et assure leur transfert une à une jusqu'à la pince, aidé en cela par une rampe d'accès et le vérin du tiroir de sélection. Le plateau tournant présente, en face du manipulateur, un porte-pièce destiné à recevoir une vis.

La figure 7-6a décrit le cycle de fonctionnement selon les trois axes xyz ; les numéros affectés aux mouvements correspondent aux numéros des étapes grafcet de la figure 7-6b.

Le grafcet représente la description séquentielle des mouvements des effecteurs du poste 1. La description faite ici est proche de celle de la figure 3-16 qui considère le point de vue partie opérative.

Le manipulateur exerce, par son vérin vertical, un mouvement de descente « 11 », puis saisit la vis dans la position basse à l'aide d'une pince « 12 » actionnée par un système pneumatique.

La vis est alors dégagée du tiroir « 13 » par remontée du vérin vertical et est transférée au-dessus du plateau par la sortie du vérin horizontal « 14 ».

Elle est ensuite déposée dans l'emplacement prévu sur le plateau tournant « 15 » puis libérée par la pince « 16 ».

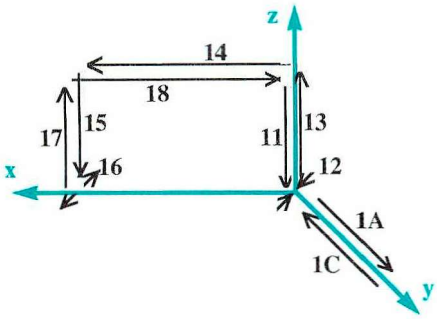


Figure 7-6a : cycle de fonctionnement du poste 1

Le manipulateur revient dans sa position initiale « 17 » puis « 18 », prêt à effectuer un nouveau transfert pour la vis suivante.

Le tiroir est relié à un vérin pneumatique qui comporte un mouvement de rentrée « 1A ». Une vis, provenant de la rampe d'accès, s'engage alors dans le tiroir, sous l'effet du bol vibrant. Le mouvement de sortie « 1C » du vérin permet ensuite au tiroir de présenter la nouvelle vis à la préhension du manipulateur.

Remarque : pour lever le problème des franchissements continuels de la transition source, « début de cycle 1 » doit être une information de type événementiel.

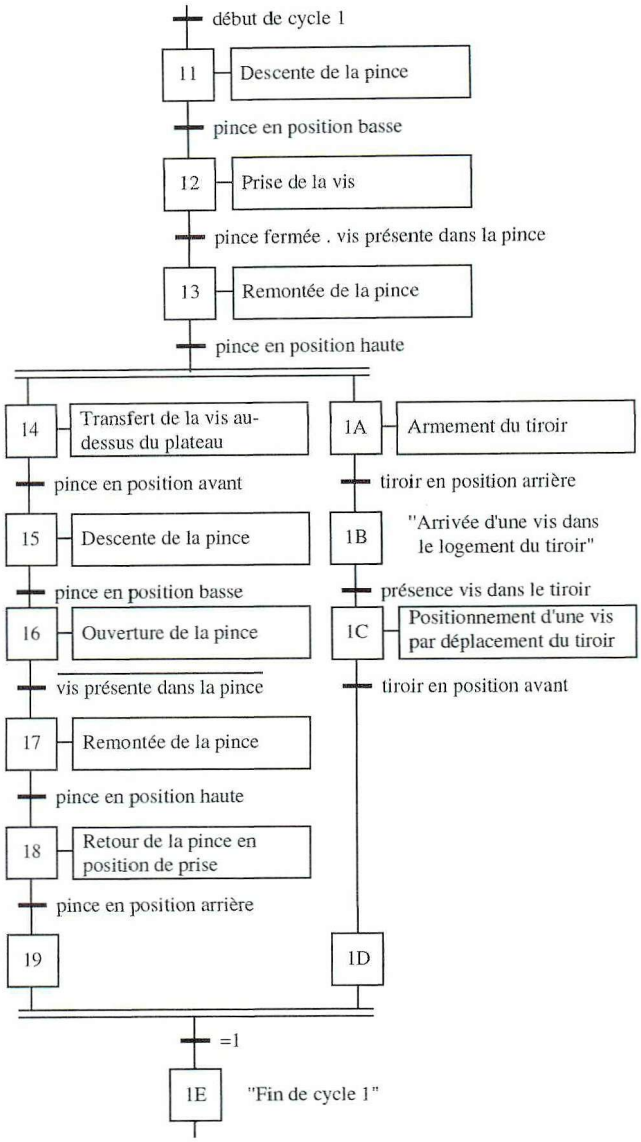


Figure 7-6b : grafcet du poste 1

7.1.4. Fonctionnement des postes 2 et 3

La description du fonctionnement du poste 1 est identique pour le poste 2 de dépose de boîtiers et le poste 3 de dépose de rondelles (voir figure 7-7).

Le poste 2 comporte, en outre, une trémie de stockage de boîtiers, permettant d'augmenter l'autonomie de fonctionnement de la machine ; le sas d'ouverture de la trémie est commandé mécaniquement par la détection du niveau de boîtiers dans le bol vibrant. Cette trémie et son mécanisme de fonctionnement n'apparaissent pas dans la description faite ici, car elle n'engage aucun composant d'automatisme.

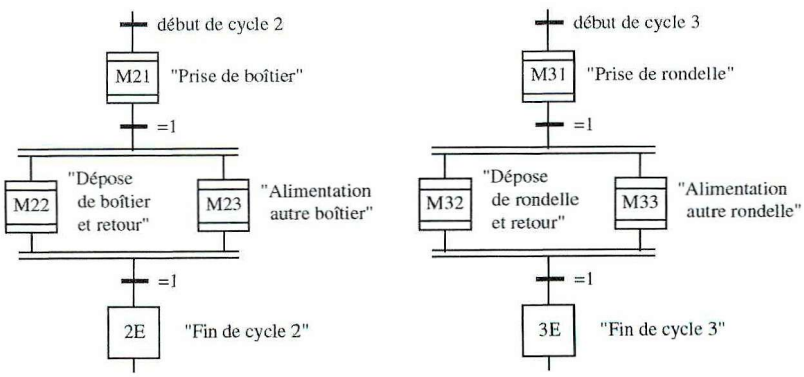


Figure 7-7 : grafcets des postes 2 et 3

7.1.5. Fonctionnement du poste 4

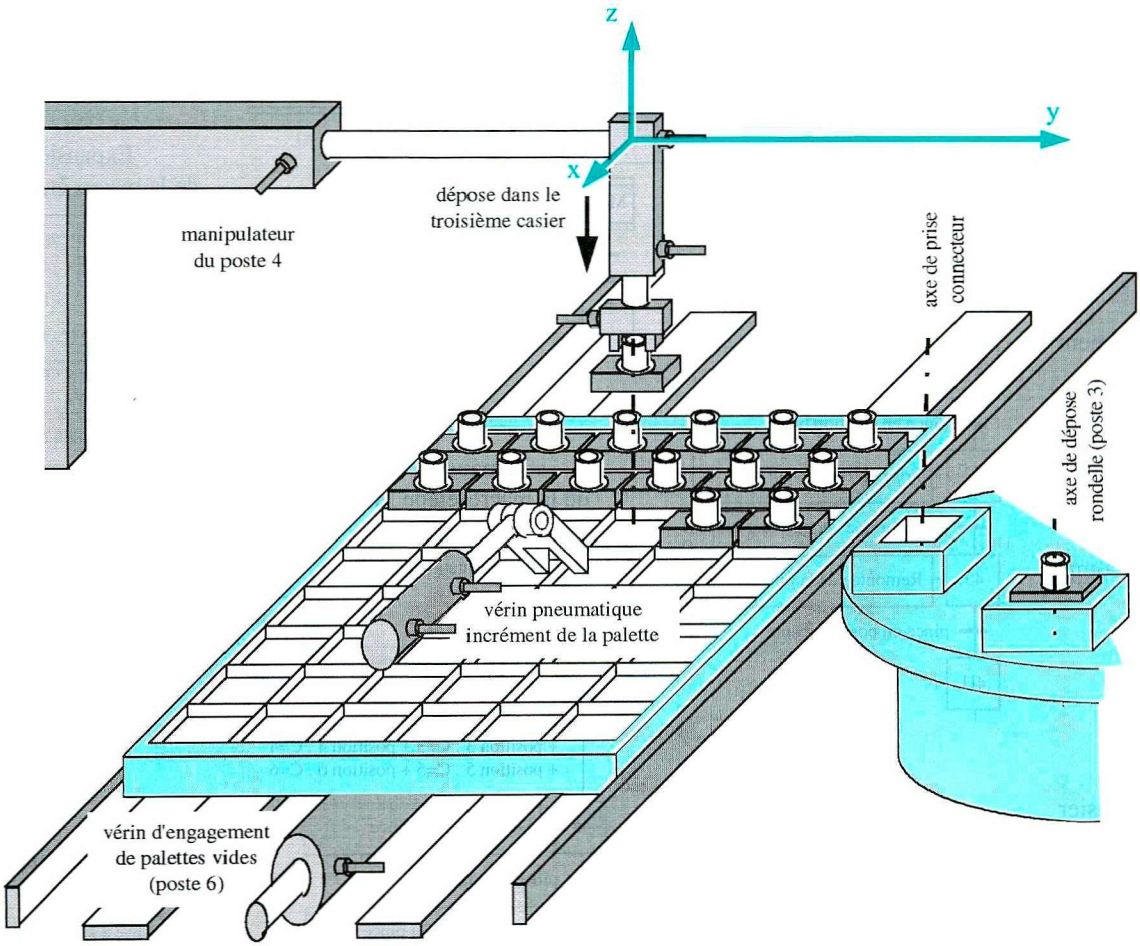


Figure 7-8 : schéma d'implantation du poste 4

Le schéma de la figure 7-8 décrit les différentes composantes du poste 4 et, en correspondance, les mouvements du manipulateur apparaissent en figure 7-9.

Le manipulateur du poste 4 doit prendre un connecteur assemblé sur le plateau, ce qui correspond à la séquence de mouvements « 41 – 42 – 43 » et le dépose sur une palette dans un des six casiers de la rangée correspondante, séquence « 44 – 45 – 46 ».

Ce manipulateur à commande « tout ou rien » devra atteindre, en plus de la position de prise du connecteur sur le plateau, six autres positions discrètes pour la dépose (« 44, 44', 44'', … »).

Pour ce faire, un système de blocage de la tige, par frein électromagnétique, lui est associé. Cette solution technique permet de garantir des écarts de position compatibles avec la géométrie des casiers de rangement. Les autres mouvements (montée, descente, prise et lâcher de pièce) sont identiques aux manipulateurs des postes précédents.

De plus, c'est au poste 4 que s'effectue le déplacement d'une rangée de la palette. Lorsque le manipulateur a déposé un connecteur dans le 6è casier d'une rangée, un vérin (pneumatique) d'incrémentation déplace la palette, permettant ainsi au manipulateur de déposer le connecteur suivant dans le premier casier de la nouvelle rangée.

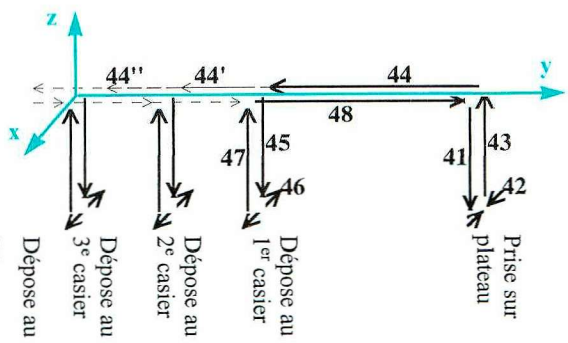


Figure 7-9 : cycle de fonctionnement du poste 4

Lorsqu'un connecteur a été déposé dans le 6e casier de la dernière rangée, la palette pleine est poussée par une nouvelle palette vide approvisionnée par le poste 6. La palette pleine est ensuite dégagée par le poste 7.

Le fonctionnement de ce poste 4 est représenté par un grafcet comportant trois macro-étapes et deux grafcets représentant des fonctions de comptage.

Avant chaque transfert de connecteur, est produit l'incrémentation du compteur de casier (X4F).

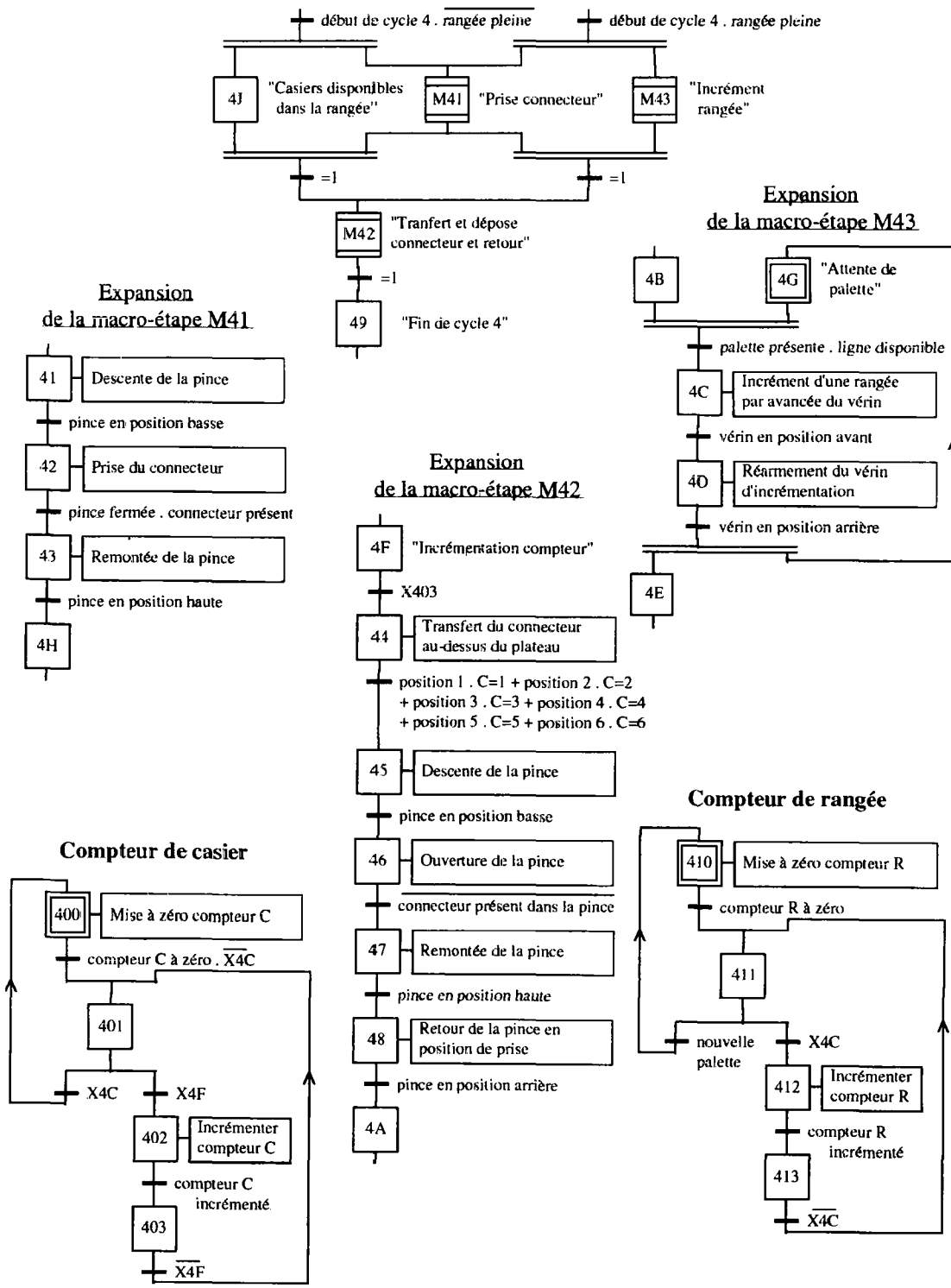


Figure 7-10 : grafcet du poste 4

Chaque déplacement d'une rangée de la palette (X4C) incrémente le compteur de rangée et réinitialise le compteur de casier.

Toute autre évolution des comptenrs n'est possible qu'au cycle suivant (verrouillage par les compléments).

Cas partieulier : l'information « nouvelle palette » (remise à zéro du compteur de rangée) est de type événementiel et ne necessite donc pas de verrouillage.

Le grafcet comportant les étapes 400 à 403 correspond au comptage par 6 des casiers, l'autre grafcet comportant les étapes 410 à 413 correspond au comptage par 8 des rangées, chaque palette comportant 8 × 6 cases.

7.1.6. Fonctionnement du poste 5

Le poste 5 est uniquement constitué d'un plateau tournant possédant un actionneur unique. Il permet (voir figure 7-11), à chaque assemblage, le passage d'un poste au poste suivant, dans l'ordre de numérotation : dépose vis au poste 1, puis dépose de boîtier au poste 2, puis dépose de rondelle au poste 3, puis évacuation du connecteur au poste 4, puis début d'un nouveau cycle. Le plateau, supportant quatre portes-pièces (un en face de chaque poste), autorise donc simultanément les déposes d'éléments et l'évacuation de l'assemblage constitué.

Le grafcet de la figure 7-12 décrit le fonctionnement de ce poste 5.

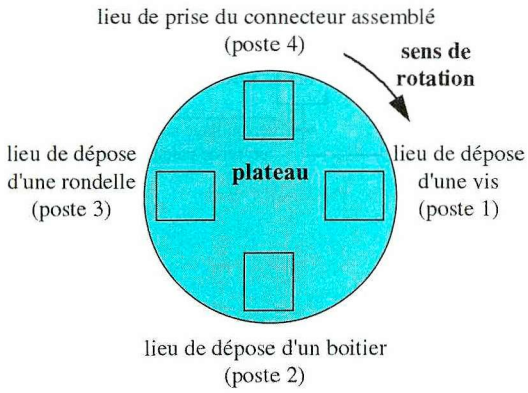


Figure 7-11 : plateau tournant

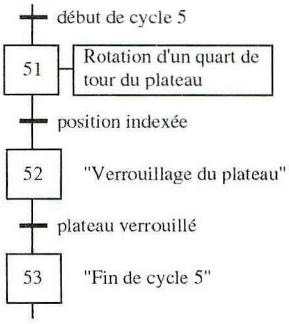


Figure 7-12 : grafcet du poste 5

7.1.7. Approvisionnement en palettes par le descenseur

Le poste 6 est constitué d'un stock de palettes vides et d'un mécanisme d'approvisionnement de type descenseur (voir figure 7-13). Le fonctionnement de ce poste est décrit par les deux grafcets de la figure 7-14.

Un vérin de transfert tire une palette pour la présenter devant le poste 4 (étapes 62 et 63).

Un système séparateur, constitué de trappes, permet d'isoler une palette de la pile et la faire descendre par gravité sur le transfert (étapes 64 à 68).

L'alimentation de la pile de palettes est faite par un opérateur. Ce dernier est prévenu par une alarme lorsque le descenseur est vide (étape 6C). Par mesure de sécurité, il doit verrouiller le dispositif pendant toute la durée de son intervention sur le descenseur (étape 6D) : tout mouvement du descenseur est alors inhibé.

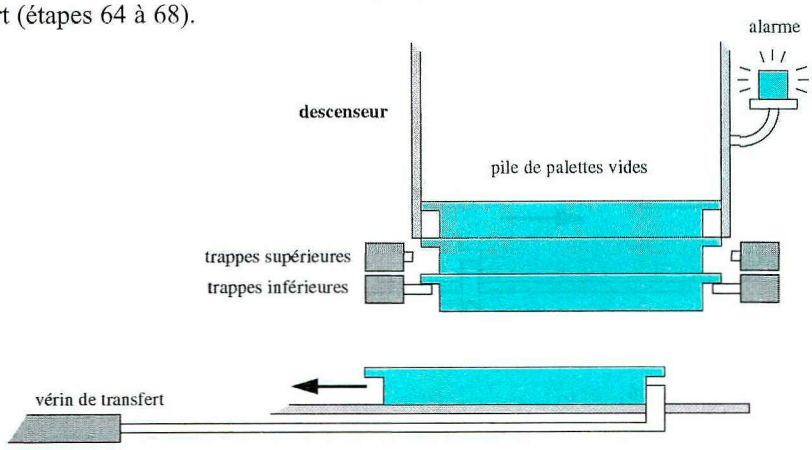


Figure 7-13 : descenseur de palettes vides

Les conditions associées aux actions des étapes 67 et 68 garantissent cette sécurité; les conditions associées aux actions des étapes 64 et 65 garantissent également cette sécurité et, de plus, bloquent le dispositif séparateur en l'absence de palette (étape 6B inactive).

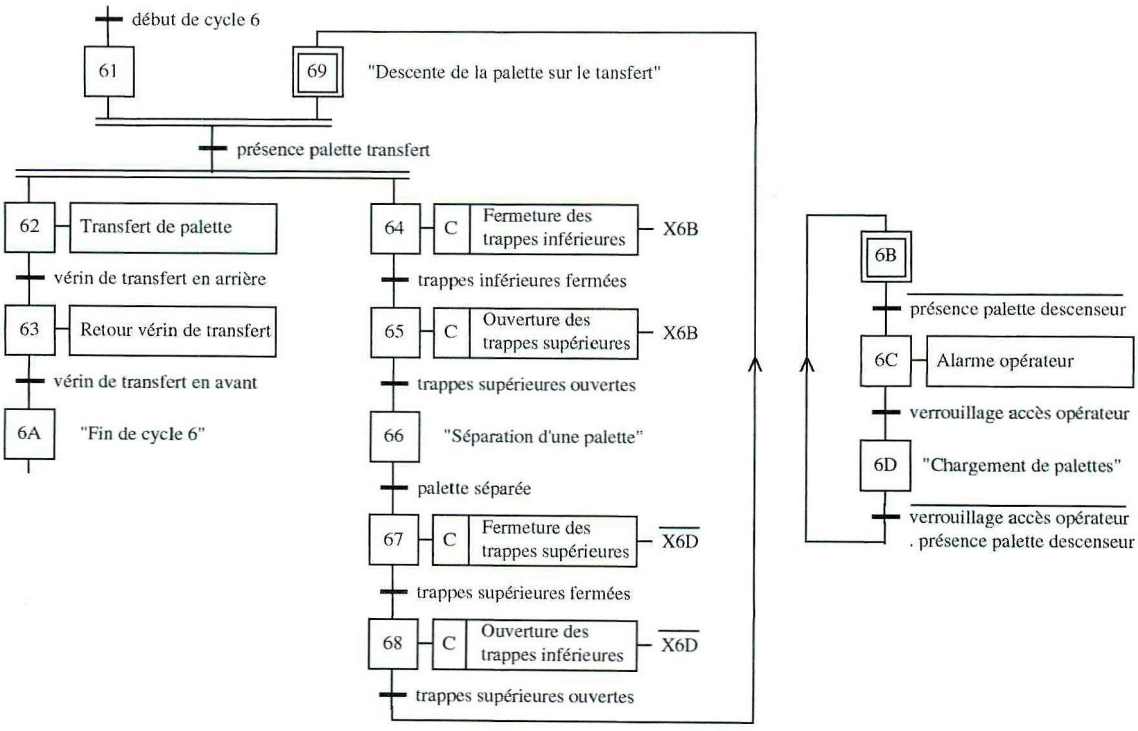


Figure 7-14 : grafcet du poste 6

7.1.8. Evacuation et stockage des palettes pleines

Le vérin d'incrémentation du poste 4 permet le déplacement d'une palette en cours de remplissage et pousse la palette pleine précédente. Cette dernière arrive à l'entrée de l'ascenseur qui la prend alors en charge. Le vérin de dégagement entraîne la palette dans l'ascenseur, puis un vérin d'ascension l'élève dans la pile. Un système mécanique d'accrochage bloque alors les palettes pour éviter leur descente (voir figure 7-15).

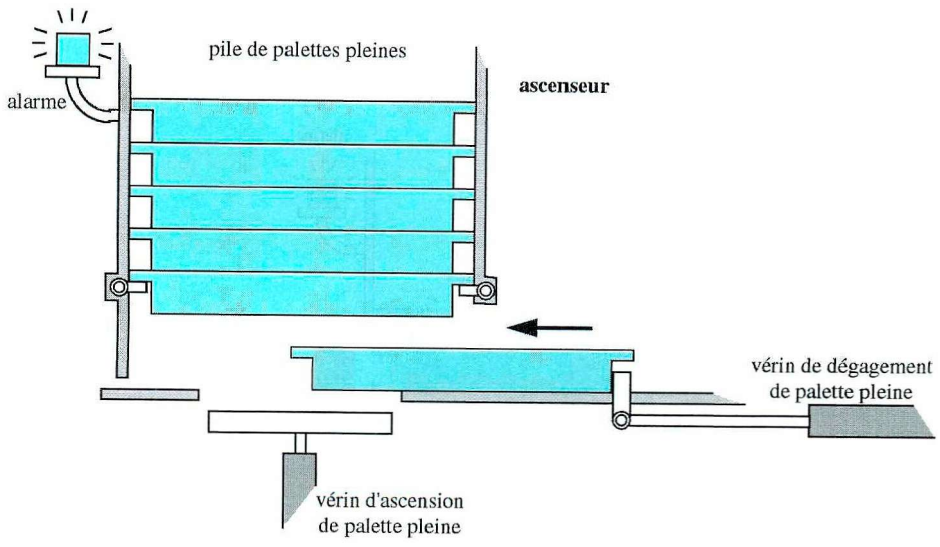


Figure 7-15 : ascenseur de palettes pleines

Le grafcet de la figure 7-16 décrit le fonctionnement de cet ascenseur.

Lorsque le niveau de stock de palettes atteint la limite haute de l'ascenseur, le système déclenche une alarme pour prévenir un opérateur du déchargement nécessaire de la pile (étape 77). Ce dernier valide son intervention à l'aide d'un interrupteur, ce qui a pour effet de verrouiller le dispositif, empêchant ainsi tout mouvement dans l'ascenseur ; il ouvre alors la porte d'accès et peut ainsi décharger les palettes pleines (étape 78). Les conditions associées aux actions des étapes 73 et 74 garantissent cette sécurité.

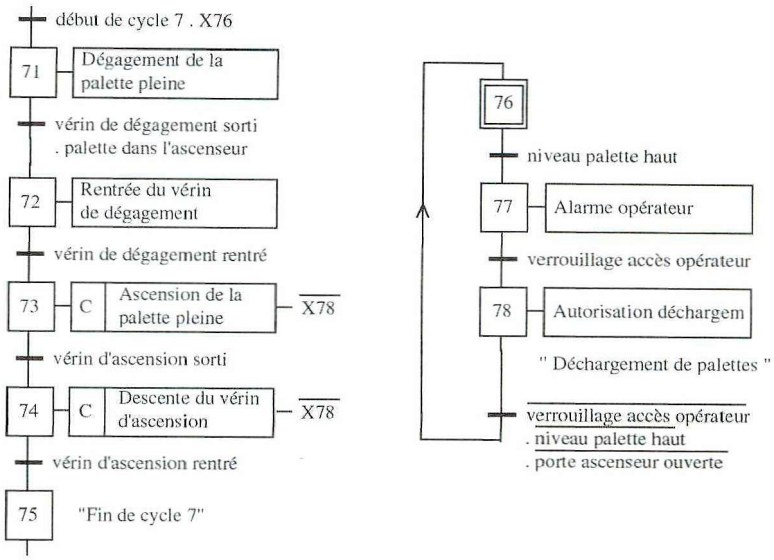


Figure 7-16 : grafcet du poste 7

7.1.9. Synchronisation des postes et conduite du système

Les grafcets traduisant le fonctionnement global de la machine et le tableau donnant la correspondance des mnémoniques utilisés sont décrit dans les pages suivantes.

Les grafcets de conduite (GC) et de surveillance (GS) du système ont été construits au chapitre 4. Il en est de même pour le grafcet de synchronisation des postes, qui utilise le concept de macro-étape.

Le présent chapitre a permis de développer les éléments de grafcet décrivant le fonctionnement de chacun des 7 postes de la machine. Pour les six premiers, ils correspondent aux expansions des macro-étapes du grafcet de synchronisation. Ces séquences ont été adaptées pour la circonstance (pour chaque expansion : mise en place d'une étape d'entrée, d'une étape de sortie, suppression de la transition source).

Une exception concerne le poste 7 qui n'est pas synchronisé avec les autres et dont le déclenchement est provoqué par un capteur qui traduit l'engorgement du poste de conditionnement. L'activation de ce gafcet se fait par une transition source en début de séquence et la désactivation par une transition puits en fin de séquence.

On peut noter l'utilisation de deux variables de temporisation (2s/X52) et (1s/X66). Au poste 5, le déverrouillage du plateau s'exécute pendant l'ordre de commande ROT5. La disparition de cet ordre produit le verrouillage (en moins de 2 secondes) qui est maintenu par la suite. Pendant l'activité de l'étape 66, un plateau tombe par gravité dans le séparateur du poste 6, ce qui a pour effet de l'isoler de la pile. On peut être sûr qu'une seconde est suffisante pour que cette opération se produise.

Un terminal d'exploitation est à la disposition de l'opérateur. Ce dernier a la possibilité de sélectionner des modes de marche (manuel, automatique, arrêts) et peut agir, en mode manuel, sur la plupart des actionneurs de chaque poste.

Pour permettre une meilleure compréhension du système, il ne sera abordé, dans cette application, que le mode de fonctionnement normal, correspondant à l'étape F1 de (GC), ce qui a pour effet de simplifier notoirement la description faite en Grafcet. C'est la raison pour laquelle les grafcets (GC) et (GS), représentés en grisé, ne sont pas totalement exploités.

Remarque :

L'utilisation de mnémoniques dans ce grafcet global ne vise qu'à simplifier la représentation (pas nécessairement la compréhension !), mais ne considère aucun changement de point de vue par rapport aux grafcets précédents.

Poste 1 : entrées

début de cycle 1		pince fermée	pf1
pince en position basse	vv1s	vis présente dans la pince	pvp1
pince en position haute	vv1r	tiroir en position arrière	vt1r
pince en position avant	vh1s	tiroir en position avant	vt1s
pince en position arrière	vh1r	présence vis dans le tiroir	pvt1

Poste 1 : sorties

Descente de la pince	MV1S
Remontée de la pince	MV1R
Transfert de la vis au-dessus	MH1S
Retour de la pince en position	MH1R
Prise de la vis	FP1
Ouverture de la pince	OP1
Armement du tiroir	MT1R
Positionnement d'une vis par déplacement du tiroir	MT1S

Poste 2 : entrées

début de cycle 2		pince fermée	pf2
pince en position basse	vv2s	boîtier présent dans la pince	pbp2
pince en position haute	vv2r	tiroir en position arrière	vt2r
pince en position avant	vh2s	tiroir en position avant	vt2s
pince en position arrière	vh2r	présence boîtier dans le tiroir	pbt2

Poste 2 : sorties

Descente de la pince	MV2S
Remontée de la pince	MV2R
Transfert du boîtier au-dessus	MH2S
Retour de la pince en position	MH2R
Prise du boîtier	FP2
Ouverture de la pince	OP2
Armement du tiroir	MT2R
Positionnement d'un boîtier	MT2S

Poste 3 : entrées

début de cycle 3		pince fermée	pf3
pince en position basse	vv3s	rondelle présente dans la pince	prp3
pince en position haute	vv3r	tiroir en position arrière	vt3r
pince en position avant	vh3s	tiroir en position avant	vt3s
pince en position arrière	vh3r	présence rondelle dans le tiroir	prt3

Poste 3 : sorties

Descente de la pince	MV3S
Remontée de la pince	MV3R
Transfert de la rondelle au-dessus	MH3S
Retour de la pince en position	MH3R
Prise de la rondelle	FP3
Ouverture de la pince	OP3
Armement du tiroir	MT3R
Positionnement d'une rondelle	MT3S

Poste 4 : entrées

début de cycle 4		pince fermée	pf4
pince en position basse	vv4s	connecteur présent dans la pince	pcp4
pince en position haute	vv4r	vérin en position avant	iav4
pince en position arrière	vh4s	vérin en position arrière	iar4
position 1	pos1	présence palette au poste 4	ppp4
position 2	pos2	rangée pleine	C=6
position 3	pos3	compteur R à zéro	R=0
position 4	pos4	compteur R incrémenté	R inc.
position 5	pos5	compteur C à zéro	C=0
position 6	pos6	compteur C incrémenté	C inc.

Poste 4 : sorties

Descente de la pince	MV4S
Remontée de la pince	MV4R
Transfert du connecteur au-dessus du plateau	MH4S
Retour de la pince en position de prise	MH4R
Prise du connecteur	FP4
Ouverture de la pince	OP4
Incrément d'une rangée par avancée du vérin	IN4S
Réarmement du vérin d'incrémentation	IN4R
Mise à zéro compteur C / R	RAZ C / R
Incrémenter compteur C / R	INC C / R

Poste 5 : entrées

début de cycle 5		plateau veroruillé	
position indexée	pri5		

Poste 5 : sorties

Rotation d'un quart de tour	ROT5

Poste 6 : entrées

début de cycle 6		trappe inférieure droite fermée	id6s
présence palette descenseur	ppd6	trappe inférieure gauche ouverte	ig6r
présence palette transfert	ppt6	trappe inférieure droite ouverte	id6r
trappe supérieure gauche fermée	sg6s	vérin de transfert en arrière	vt6r
trappe supérieure droite fermée	sd6s	vérin de transfert en avant	vt6s
trappe supérieure gauche ouverte	sg6r	verrouillage accès opérateur	op6
trappe supérieure droite ouverte	sd6r	palette séparée	
trappe inférieure gauche fermée	ig6s		

Poste 6 : sorties

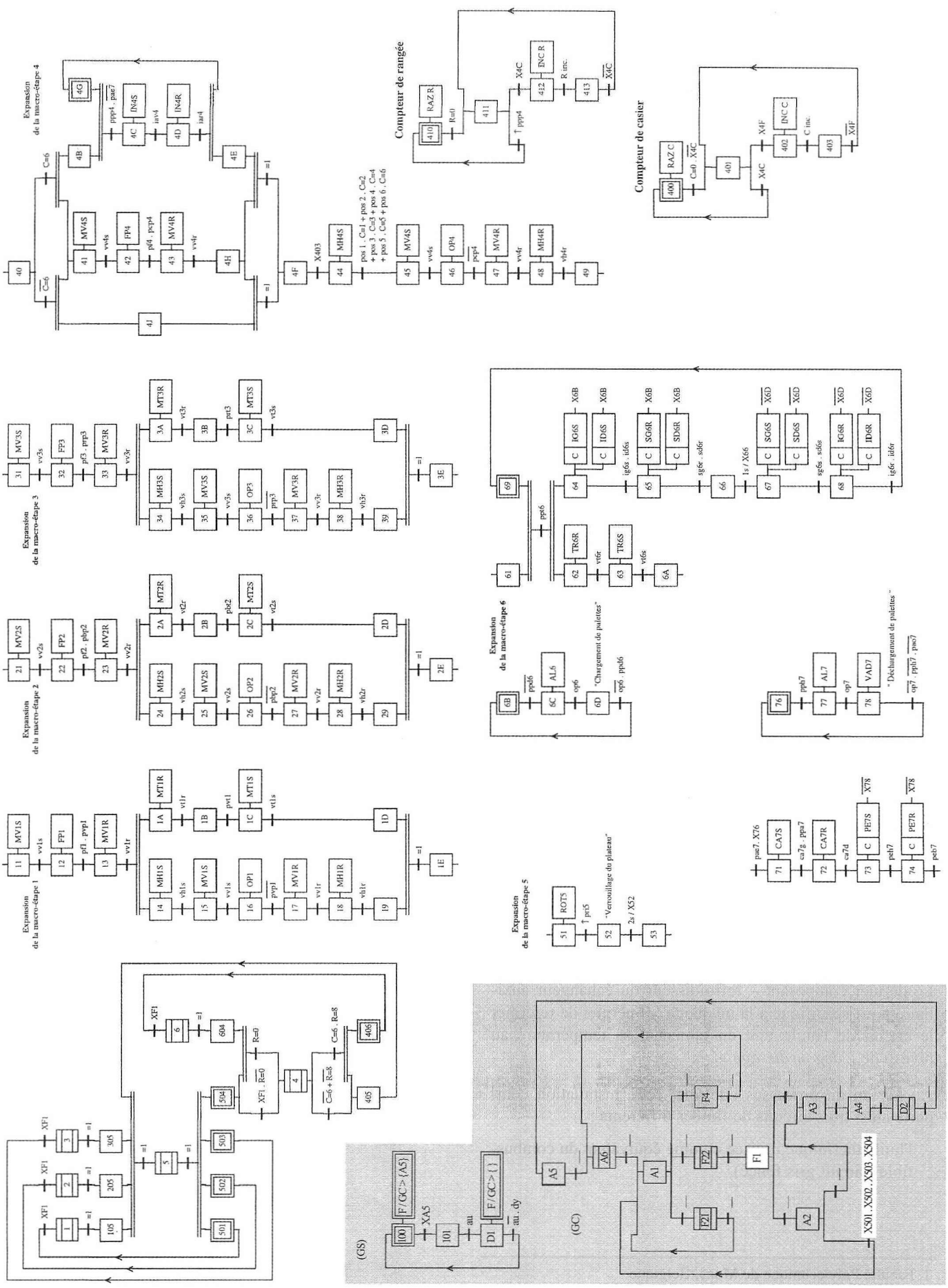
Fermeture de la trappe supérieure gauche	SG6S
Fermeture de la trappe supérieure droite	SD6S
Ouverture de la trappes supérieure gauche	SG6R
Ouverture de la trappes supérieure droite	SD6R
Fermeture de la trappe inférieure gauche	IG6S
Fermeture de la trappe inférieure droite	ID6S
Ouverture de la trappes inférieure gauche	IG6R
Ouverture de la trappe inférieure droite	ID6R
Transfert de palette	TR6R
Retour vérin de transfert	TR6S
Alarme opérateur	AL6

Poste 7 : entrées

début de cycle 7	pae7	palette dans ascenseur	ppa7
vérin de dégagement sorti	ca7g	niveau palette haut	pph7
vérin de dégagement rentré	ca7d	verrouillage accès opérateur	op7
vérin d'ascension sorti	peh7	porte ascenseur ouverte	pao7
vérin d'ascension rentré	peb7	palette à l'entrée de l'ascenseur	pae7

Poste 7 : sorties

Dégagement de la palette pleine	CA7S
Rentrée du vérin de dégagement	CA7R
Ascension de la palette pleine	PE7S
Descente du vérin d'ascension	PE7R
Alarme opérateur	AL7
Autorisation déchargement	VAD7


Expansion de la macro-étape 1
Expansion de la macro-étape 2
Expansion de la macro-étape 3
Expansion de la macro-étape 4
Expansion de la macro-étape 5
Expansion de la macro-étape 6
Compteur de rangée
Compteur de casier
"Chargement de palettes"
"Déchargement de palettes"
"Verrouillage du plateau"
(GS)
(GC)

7.2. Application n° 2 : réchauffeur d'huile

7.2.1. Introduction au réchauffeur d'huile : cadre d'application

Parmi les combustibles liquides provenant de la distillation du pétrole brut, les fuels lourd et extra-lourd sont les plus utilisés dans l'industrie par suite de leur faible prix de revient. Toutefois, leur importante viscosité à la température ambiante rend impossible leur utilisation sans traitement préalable, aussi bien pour l'opération de pompage du combustible hors de son réservoir que pour sa pulvérisation en fines gouttelettes au niveau des brûleurs.

Mettant à profit l'influence de la température sur la viscosité, leur préparation comprend généralement une première phase de préchauffage dit *« de dégourdissage »*, interne au réservoir de stockage et qui permet d'atteindre un seuil de viscosité facilitant le pompage vers le brûleur puis une seconde phase de préchauffage permettant de rendre le fluide pulvérisable au niveau du brûleur. Afin d'obtenir une finesse de pulvérisation constante, il est essentiel de maintenir la viscosité à une valeur relativement stable indépendamment du débit demandé d'où le recours à une régulation pour le contrôle de la température du fluide au niveau du réchauffeur.

7.2.2. Une transposition pédagogique

En vue de réaliser des manipulations de « travaux pratiques » consacrées à une application industrielle, le service de Thermique et d'Emploi des Combustibles[1] a procédé à une transposition de ce type d'installation dans ses locaux. Cette transposition respecte les exigences suivantes :

- Le réchauffeur fonctionne dans des conditions typiques d'installations industrielles réelles.
- Les équipements correspondants (échangeur, vanne, purgeurs, ...) sont des équipements industriels tels que ceux rencontrés couramment pour cette application.

Par contre, le reste de l'installation est spécifique ; en particulier :

- Le **F.O.L.** (Fuel Oil Lourd) est remplacé par une huile thermique pour des raisons de sécurité.
- Il n'y a pas d'utilisation de cette huile, en sorte qu'elle « tourne en circuit fermé » : autrement dit, le dégourdisseur est remplacé par un refroidisseur et le réservoir de stockage par un réservoir beaucoup plus petit placé après le refroidisseur.

7.2.3. Description de l'installation

Le schéma de principe de la maquette est reproduit à la figure 7-17. Une huile thermique dont la viscosité est proche de celle d'un **F.O.L.** moyen est utilisée.

On y note le réservoir d'huile thermique encore appelé *bâche*, la pompe et le réchauffeur dit échangeur principal ; cet ensemble correspondant aux éléments rencontrés dans les installations industrielles.
Le dernier composant – refroidisseur ou échangeur auxiliaire – est spécifique à la maquette : il permet de refermer le circuit de l'huile tout en ramenant sa température au niveau de *« dégourdissage »*.

Au niveau du processus contrôlé, cette installation comporte ainsi trois circuits de fluides différents :

- l'huile thermique utilisée comme équivalent du combustible (circuit gris foncé),
- la vapeur saturée utilisée comme fluide de chauffage (circuit vert foncé),
- l'eau utilisée comme fluide de refroidissement (circuit vert clair).

Le premier est un circuit fermé sans aucune connexion avec l'extérieur ; les deux autres sont des circuits ouverts : leur entrée est raccordée à un circuit de distribution – respectivement de vapeur et d'eau brute – et leur sortie est raccordée à un collecteur d'effluents (commun).

1. Faculté Polytechnique de Mons, Belgique

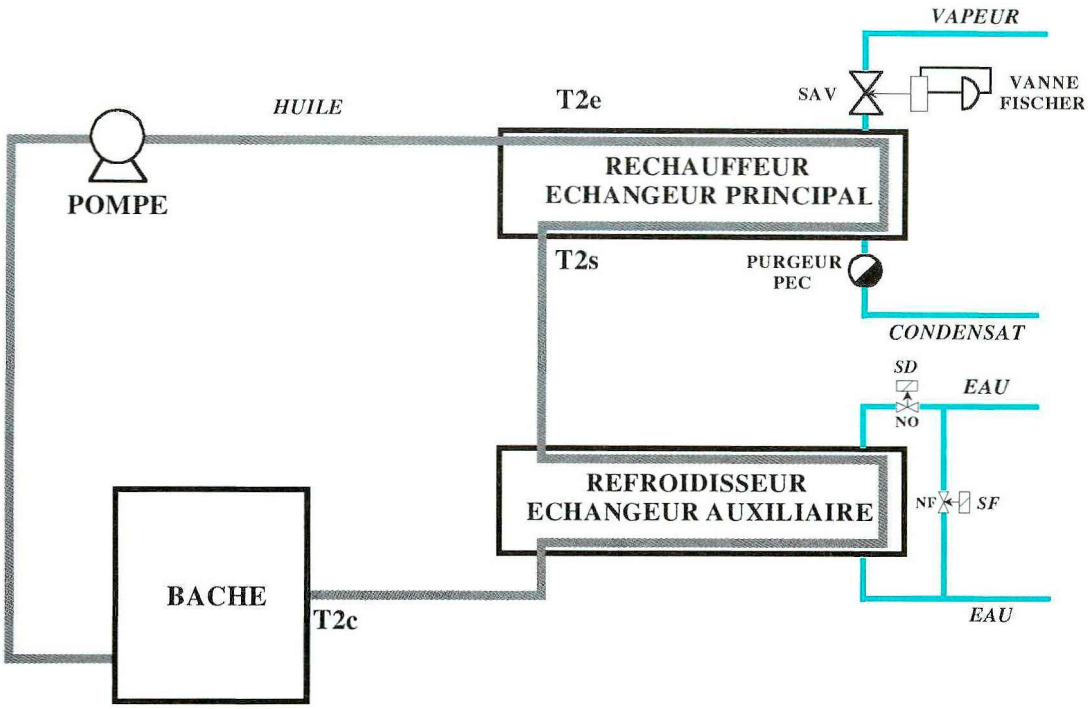


Figure 7-17 : schéma de principe

Les équipements essentiels sont les équipements ***« procédé »*** c.-à-d. :

- le ***réchauffeur***, couplant le circuit de vapeur et le circuit d'huile,
- le ***refroidisseur***, couplant le circuit d'huile et le circuit d'eau de refroidissement,
- la ***pompe à huile***,
- le ***réservoir d'huile*** (ou ***bâche***).

Il faut y ajouter un équipement de sécurité :

- le refroidisseur de condensat : échangeur de refroidissement des rejets, destiné à réaliser une température de rejet inférieure à 40 °C (tenue des tuyaux en PVC constituant le collecteur d'effluents).

L'instrumentation de commande requise pour ajuster les conditions de fonctionnement est constituée de :

- un variateur de vitesse de moteur de pompe (variateur de fréquence), permettant d'agir sur le débit d'huile,
- une soupape régulante notée **SAV**, à commande pneumatique, permettant d'agir sur la pression donc sur la température de vapeur dans le réchauffeur,
- une soupape **TOR** (*Tout-Ou-Rien*) notée ***SD***, à commande électromagnétique, permettant d'agir sur le débit d'eau dans le refroidisseur.

Cette instrumentation nécessite :

- un circuit de fluide supplémentaire : le circuit d'air comprimé (circuit gris clair), qui assure 2 fonctions :
  - la commande de la soupape **SAV**,
  - et le positionnement du détendeur de vapeur ***VDV*** (ce détendeur isole l'installation par rapport aux fluctuations de pression du circuit de distribution de vapeur),
- une ligne de contournement du refroidisseur : cette ligne – munie d'une soupape à commande électromagnétique ***SB***, fonctionnant en bascule avec ***SD*** – permet d'éviter le « coup de bélier » lors de la fermeture de ***SD***.

La structure complète de l'ensemble est reprise à la figure 7-18.

Figurent également sur ce synoptique trois lignes auxiliaires, activées uniquement lors du démarrage :

- la ligne d'injection d'eau de refroidissement dans les rejets (munie de la soupape à commande électromagnétique ***SRE***),
- la ligne de purge de la tuyauterie de distribution de vapeur (munie de la soupape à commande électromagnétique ***SPV***),
- la ligne d'éventage de l'enveloppe du réchauffeur (munie de la soupape à commande électromagnétique ***SEV***).

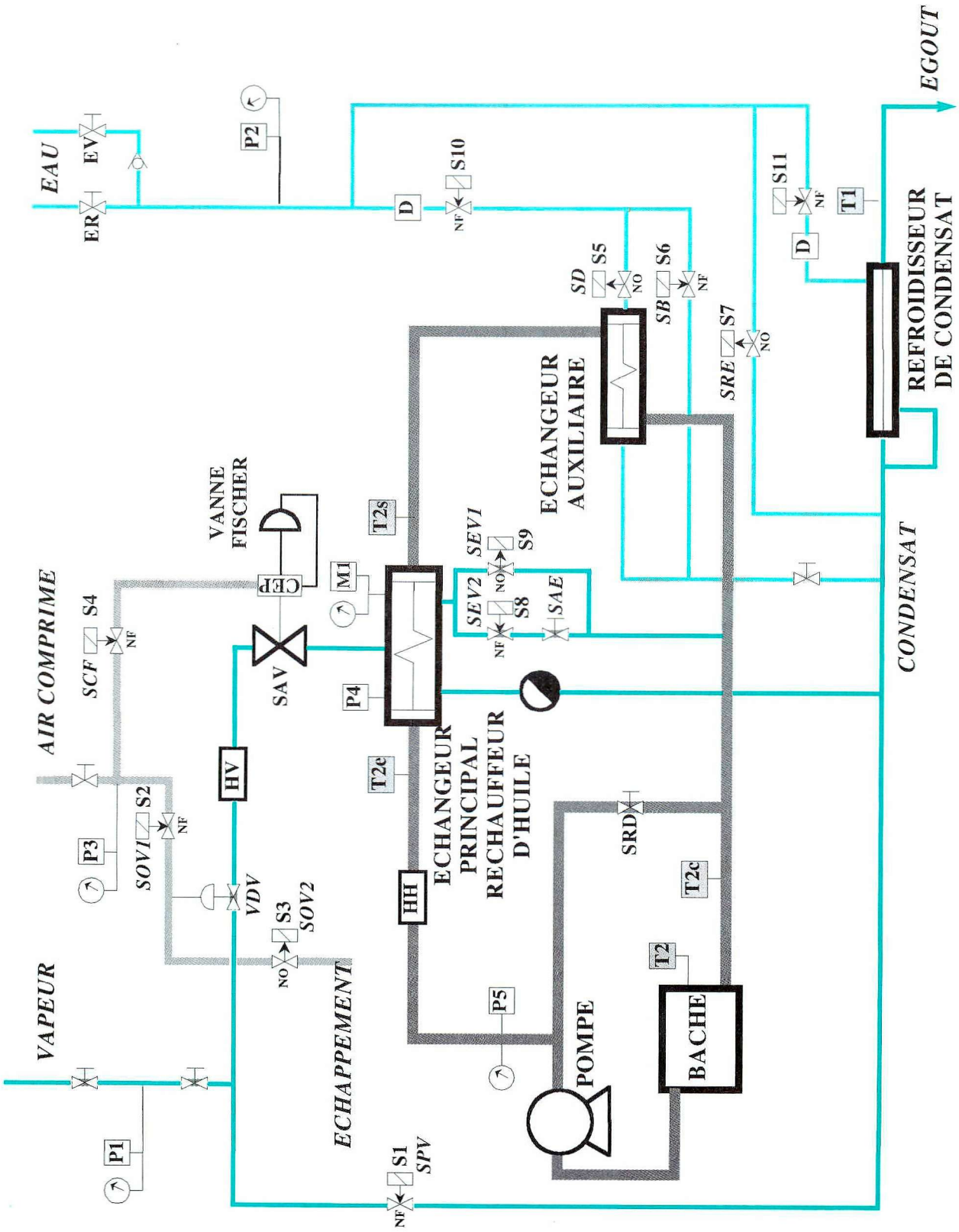


Figure 7-18 : structure détaillée de l'installation

L'installation transposée est donc finalement une boucle d'essai qui n'a que quelques éléments en commun avec l'installation industrielle originelle.

Toutefois, compte tenu de la nécessité de respecter un minimum de contraintes lors de la mise en marche et l'arrêt d'une telle installation (prise en compte de conditions de bonne pratique) et la fréquence de telles opérations, le service décida d'automatiser l'ensemble de la conduite de ce processus. En complément, cette automatisation permet de s'assurer d'un ensemble de sécurités durant les phases de manipulations.

Telle quelle, elle constitue une installation thermique suffisamment représentative et d'un niveau de complexité adéquat pour envisager son automatisation :

- 4 fluides dont l'un change de phase,
- 3 échangeurs différents,
- divers organes de réglage,
- des configurations temporaires de démarrage et/ou d'arrêt,
- 2 consignes opérationnelles et diverses contraintes de sécurité.

Ce second exemple d'application s'avère être un système mixte à processus continu et discontinu utilisant essentiellement des commandes de type **T.O.R.** durant les phases de démarrage et d'arrêt.

7.2.4. Conduite de l'installation

7.2.4.1. Etats fondamentaux

On distingue trois états fondamentaux pour l'installation : ***« arrêt/hors service »***, ***« arrêt/en service »*** et ***« en fonctionnement »***. Ces états sont définis comme suit :

- ***« arrêt/hors service »*** : les vannes (manuelles) d'arrêt des circuits de vapeur, d'eau, et d'air comprimé sont fermées ; l'alimentation électrique est coupée.
- ***« arrêt/en service »*** : les vannes (manuelles) d'arrêt des circuits de vapeur, d'eau, et d'air comprimé sont ouvertes, ainsi que l'alimentation électrique. (Néanmoins, aucun équipement ni instrument interne n'est mis sous tension). L'eau circule dans le circuit d'eau de refroidissement via la ligne d'injection dans les rejets (vanne ***SRE*** ouverte par défaut).
- ***« en fonctionnement »*** : présence de fluide *« actif »* dans les 4 circuits (traduite par une pression *« suffisante »*) et température de rejet des eaux usées inférieure à 40 °C.

Ces dernières conditions sont les conditions nécessaires pour que le procédé **puisse** se dérouler. Si le procédé se déroule effectivement – c.-à-d. si non seulement l'huile circule, mais qu'en outre elle est réchauffée grâce à la vapeur admise dans le réchauffeur et ensuite refroidie grâce à l'eau admise dans le refroidisseur – le fonctionnement est dénommé ***« normal »***. La réalisation d'un fonctionnement normal requiert que les signaux de commande adéquats soient appliqués aux actionneurs ***« procédé »*** : variateur de vitesse de pompe et actionneurs des vannes d'admission de vapeur et d'eau.

7.2.4.2. Mise à l'arrêt

La mise à l'arrêt correspond au passage de l'état ***« en fonctionnement »*** à l'état ***« arrêt/en service »***.

Elle est provoquée soit – automatiquement – par le non respect des conditions de fonctionnement (perte accidentelle d'un fluide), soit – volontairement – par action sur un bouton d'arrêt.

Elle est constituée par la séquence d'opérations suivante :

- coupure de l'admission de vapeur (fermeture de ***VDV*** par fermeture de ***SOV1*** et ouverture de ***SOV2***, fermeture de **SAV** par fermeture de ***SCF***)
- lorsque la pression effective de vapeur dans l'enveloppe du réchauffeur tombe sous 0,2 bar : mise à l'atmosphère de cette enveloppe, par ouverture de la vanne ***SEV1***. Cette manoeuvre – appelée casse-vide – vise à empêcher la mise en dépression de l'enveloppe. Bien évidemment, celle-ci se remplit d'air.
- mise progressive à l'arrêt de la circulation d'huile (par déclenchement du moteur de la pompe).

7.2.4.3. Démarrage

Le démarrage est la séquence d'opérations qui amène l'installation de l'état *« arrêt/en service »* à l'état *« en fonctionnement »* normal. Celui-ci est déterminé par les valeurs assignées – en fin de démarrage – aux variables de commande des actionneurs *« procédé »*. Les valeurs assignées à ces variables *en cours* de démarrage peuvent être manipulées à des fins d'optimisation. Dans la variante de conduite ici présentée, on peut mettre en évidence les gestions de commande des divers actionneurs *« procédé »*. Ainsi :

- **pour la commande de la vanne *SD*** représentant l'admission d'eau dans l'échangeur auxiliaire : il convient de maintenir cette vanne fermée tant que la température de l'huile est inférieure à 55 °C. Si la soupape ***SD*** est maintenue fermée, en corollaire, ***SB*** est maintenue ouverte, l'huile n'est donc pas refroidie. Cette contrainte d'optimisation permet d'accélérer le réchauffage de l'huile dans la bâche. Lorsque la température **T2** atteint 55 °C, les soupapes ***SD*** et ***SB*** sont placées sous contrôle du régulateur de la température **T2e**. Ce dernier est typiquement un **PID** à action de type **T.O.R.**

- **pour la commande de vitesse de pompe :**
  - tant que la température **T2e** est inférieure à 41 °C, la régulation du débit est assurée avec une valeur minimale de 0,4 kg/s afin d'éviter de surcharger le moteur.
  - dès que la température **T2e** dépasse 41 °C et tant qu'elle reste inférieure à 55°C, la régulation de débit est portée à sa valeur maximale de 0,7 kg/s.
  - dès que la température **T2e** dépasse 55 °C, le débit est fixé à sa valeur nominale de 0,55 kg/s.

- **pour la commande de la vanne *SAV* :**
  - tant que la température **T2s** est inférieure à 72 °C, la vanne est en ouverture maximale de manière à optimiser la durée de la phase de démarrage.
  - dès que la température dépasse 72 °C, la régulation de la température **T2s** est activée à sa valeur nominale de 80 °C.

La régulation est ici du type analogique obtenue via un convertisseur électropneumatique ***CEP*** assurant le contrôle d'ouverture de la vanne **SAV**. Dans certaines circonstances, le contrôle de pression assuré par la vanne de régulation **SAV** peut ne pas être suffisant (**SAV** peut annuler toute arrivée de vapeur mais ne peut procéder à la réduction de pression dans l'enceinte de l'échangeur principal) d'où une possibilité additionnelle de réduction de pression offerte par ***SEV2*** qui pourrait intervenir dans le processus de régulation par action du type *« tout-ou-rien »*.

Séquence opératoire à respecter :

Compte tenu de ce qui précède, on peut opter pour la séquence d'opérations suivante :

- initialisation, action sur le bouton de démarrage.

- vérification de l'état *« arrêt/en service »* c.-à-d. de la présence (pression) de fluide dans les circuits de vapeur, d'eau et d'air comprimé.

- ouverture de l'admission d'eau de refroidissement vers le refroidisseur (vanne **S10**) et vers le refroidisseur de condensat (vanne **S11**).

- enclenchement de la pompe de circulation d'huile (la vitesse de rotation dépend de la valeur qui a été assignée au signal de commande lors de l'initialisation).

- ouverture – temporisée – de la ligne de purge de la tuyauterie de distribution de vapeur (vanne ***SPV***). Cette opération vise à éliminer le condensat qui a pu s'accumuler dans la tuyauterie en cours d'arrêt. On parle de « purge du premier tronçon vapeur ».

- ouverture – temporisée – du détendeur de vapeur ***VDV*** par application de l'air comprimé (fermeture ***SOV2***, ouverture ***SOV1***). La soupape d'admission **SAV** reste fermée. On parle de « purge du second tronçon vapeur ».

- ouverture de la soupape d'admission de vapeur **SAV** par application de la pression d'air comprimé (ouverture de ***SCF***). Le degré d'ouverture de la vanne dépend de la valeur qui a été assignée au signal de commande lors de l'initialisation.

- dès que la pression effective dans l'enveloppe dépasse 0,2 bar, la soupape ***SEV1*** (ouverte jusque là) est refermée. L'éventage de l'enveloppe est considéré comme suffisant.

- fermeture de la ligne d'injection d'eau de refroidissement dans les rejets (vanne ***SRE***), pour autant que cela ne provoque pas une remontée de la température de rejet au-dessus de 40 °C.

Le démarrage est considéré comme terminé lorsque les rejets en condensats sont stabilisés ce qui se traduit par le fait que la vanne ***SRE*** est restée fermée pendant 2 minutes d'affilée.

7.2.5. Une description Grafcet basée sur les modes de marches et d'arrêt

Les opérations de démarrage et de conduite de l'installation peuvent être représentées à partir d'une analyse de type « **Etude des modes de marches et d'arrêt** » dont on peut déduire une première description de type **Grafcet**.

Il convient toutefois de remarquer que l'ensemble du procédé ici étudié peut être considéré comme l'association de 2 procédés distincts pouvant éventuellement se communiquer des informations entre eux. Ainsi, on peut distinguer :

- le procédé réchauffeur d'huile,
- le procédé contrôle des eaux de rejet.

Pour chacun de ces deux procédés, un grafcet unique connexe pourrait être défini, la structure graphique étant alors relativement complexe. Le grafcet décrivant le procédé contrôle des eaux de rejet a été élaboré au chapitre 3 (voir paragraphe 3.4.).

Pour le procédé *réchauffeur d'huile*, selon la description donnée ci-avant et la conduite du processus exposée, on peut mettre en évidence les modes suivants :

- La partie ***« commande hors énergie »*** nommée ici *« arrêt hors service »* et caractérisée par l'ensemble des vannes assurant la sécurité par leur simple position de repos.
- La partie ***« commande sous énergie »*** avec des modes comme :
  - ***« l'arrêt dans l'état initial »*** nommé ici *« arrêt en service »* caractéristique de la mise sous tension de la partie commande et constituant l'état de repos de l'installation.
  - ***« la production normale »*** nommée ici *« en fonctionnement »* caractéristique de l'état pour lequel toutes les régulations sont actives.
  - ***« la marche de préparation »*** nommée ici *« démarrage »* et qui reprend l'ensemble des opérations à réaliser pour amener le système de l'arrêt en service vers le fonctionnement.
  - ***« la marche de clôture »*** nommée ici *« mise à l'arrêt »* et qui reprend l'ensemble des opérations à réaliser pour amener le système du fonctionnement à l'arrêt en service.

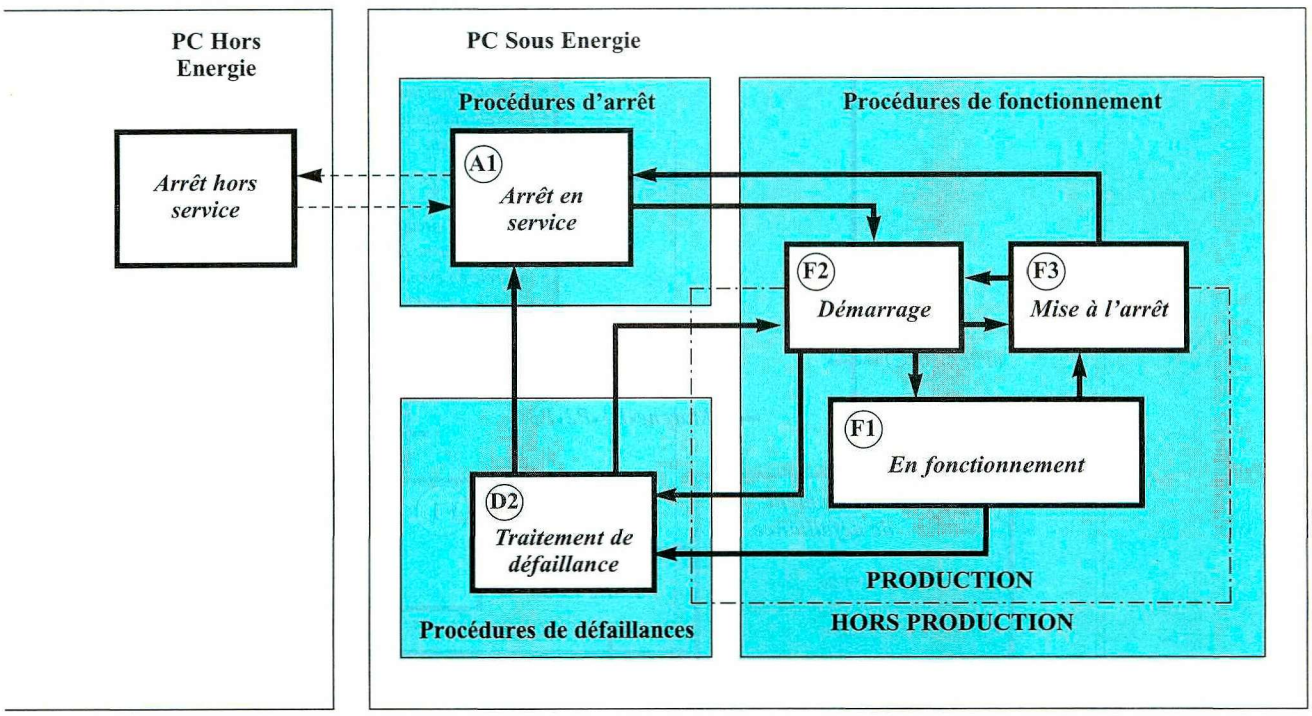


figure 7-19 : GEMMA simplifié pour l'application étudiée

Il faut y ajouter *« le traitement de défaillance »* à prendre en compte à tout moment si l'un des fluides vient à manquer et qui consiste à laisser l'installation se refroidir naturellement. On notera qu'à partir de cet état, on tolère une reprise accélérée si les fluides sont rétablis et qu'une demande en est faite.
On peut ainsi dresser le **GEMMA** repris à la figure 7-19. Dans celui-ci, on précisera les conditions de passage entre les différents états :

- **Passage de A1 vers F2**: il nécessite un ordre de marche (poussoir) et la présence des différents fluides à savoir par mesure au niveau des pressostats :
  - **P1** : une pression suffisante pour le circuit vapeur,
  - **P2** : une pression suffisante pour le circuit eau,
  - **P3** : une pression suffisante pour le circuit air comprimé.
- **Passage de F2 vers F1**: il nécessite une stabilisation des rejets traduite par l'arrêt d'ajout d'eau de mélange depuis 2 min au moins.
- **Passage de F1 vers F3** : il nécessite un ordre d'arrêt.
- **Passage de F3 vers A1** : il nécessite que la température de l'huile pompée (dans la cuve) redevienne inférieure à une valeur préfixée (ici, 30 °C).

Le traitement de défaillance (**vers D2**) est activé par la perte d'un des fluides (vapeur, eau ou air comprimé), ces mesures étant effectuéee à partir de **P1**, **P2** et **P3**.

La condition de passage de **D2 vers A1** est similaire à **F3 vers A1**.

On notera qu'une demande d'arrêt doit être prise en compte même durant la phase de démarrge.

D'autre part, une reprise à chaud est prévue à partir de **F3** ou de **D2** si un ordre de marche est donné et si la présence des fluides est validée.

On obtient ainsi le **GEMMA** complété de la figure 7-20.

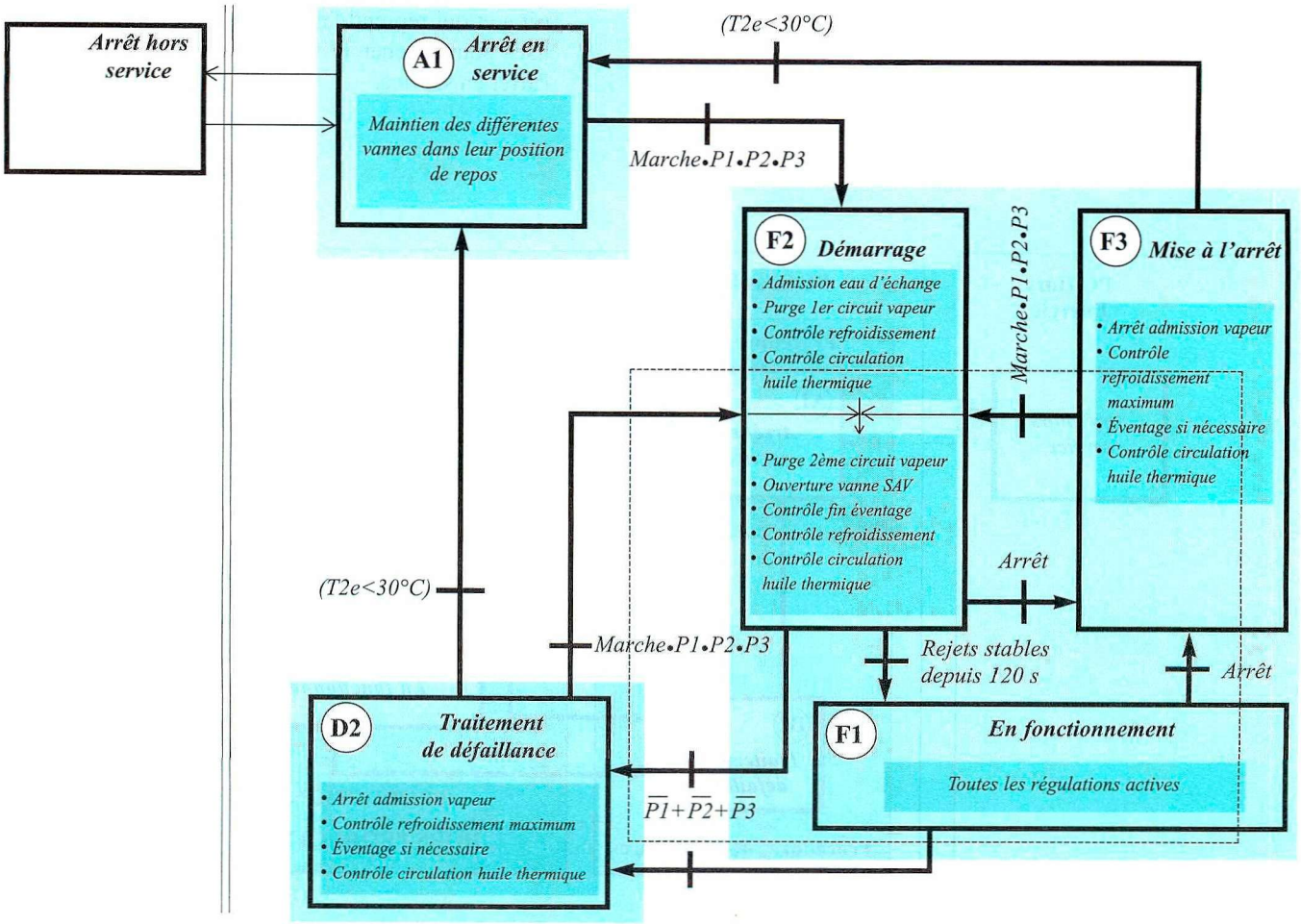


Figure 7-20 : GEMMA complété pour l'application étudiée

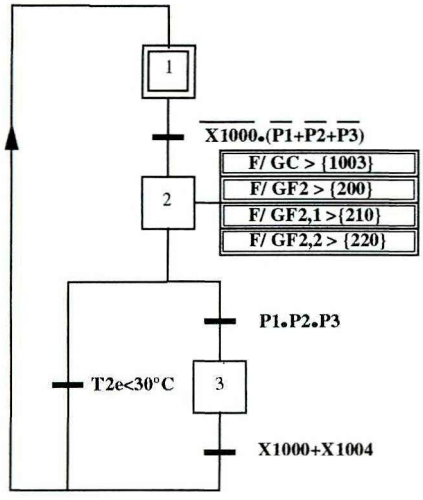
Dans celui-ci, les opérations à réaliser dans les divers modes repris ont été précisées sur base des spécifications énoncées. On notera que la phase de démarrage comporte 2 phases successives, la première n'étant nécessaire qu'en phase de démarrage à froid (purge du premier tronçon du circuit vapeur), la seconde étant réalisée dans tous les cas de redémarrage.

Sur base de l'approche méthodologique exposée au chapitre 4 (paragraphe 4.3.4.), on élabore l'ensemble des grafcets, soit respectivement :

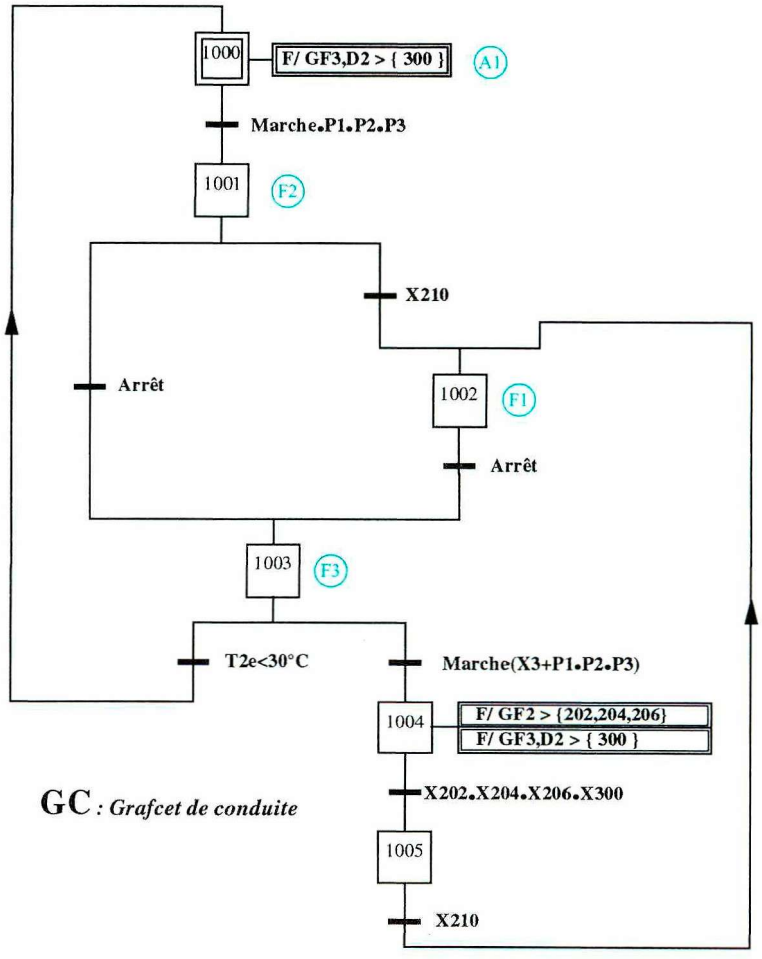
- Un grafcet de sûreté traitant la procédure de défaillance noté **GS** et hiérarchiquement supérieur.
- Un grafcet de conduite noté **GC** qui au niveau de la hiérarchie, est immédiatement inférieur et reprend la structure de la grille **GEMMA**.

Enfin, un ensemble de grafcets hiérarchiquement inférieurs et qui sont associés aux différents modes. On y trouvera :

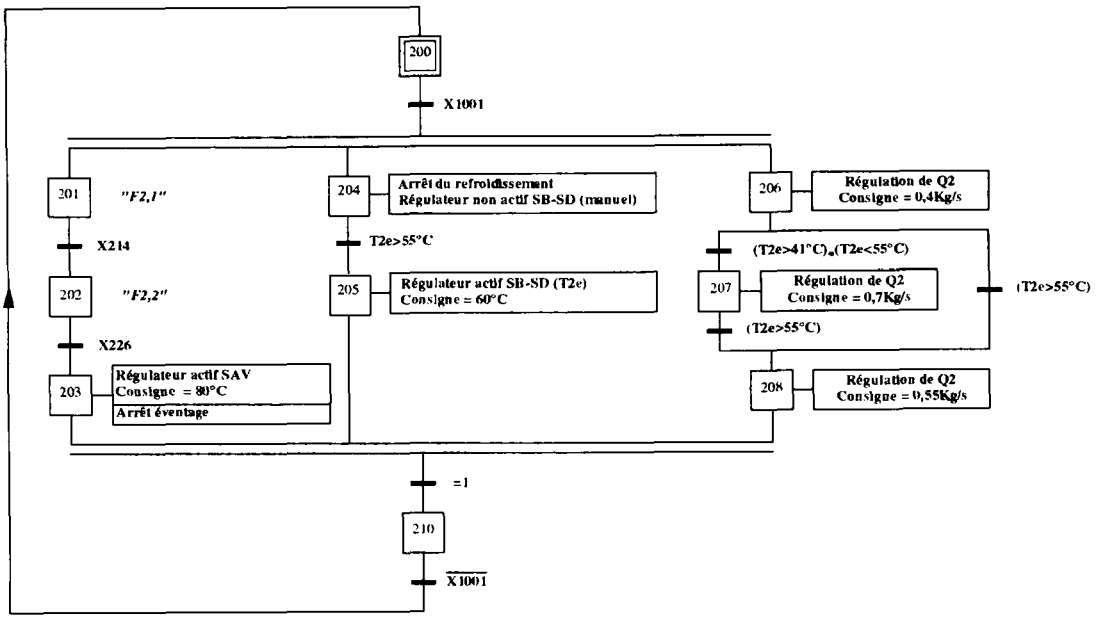
- Un grafcet associé au mode **F2 « Démarrage »**. On y trouve 3 séquences parallèles correspondant chacune à la gestion d'un fluide (vapeur, eau de refroidissement, huile). La gestion « vapeur » fait référence à deux grafcets notés respectivement :
  - **F2,1** reprenant la première phase relative au seul démarrage à froid,
  - **F2,2** reprenant la seconde phase relative à toutes les procédures de redémarrage.
- Un grafcet associé au mode **F3 « Mise à l'arrêt »**. On y trouve 3 séquences parallèles correspondant à la gestion des fluides (vapeur, eau de refroidissement, huile) plus la gestion de l'éventage. Ce grafcet assurant le refroidissement correct de l'installation est aussi activé en cas de « traitement de défaillance » **D2** d'où sa dénomination **F3, D2.**
- Un grafcet associé au mode **F1 « Fonctionnement normal »**.



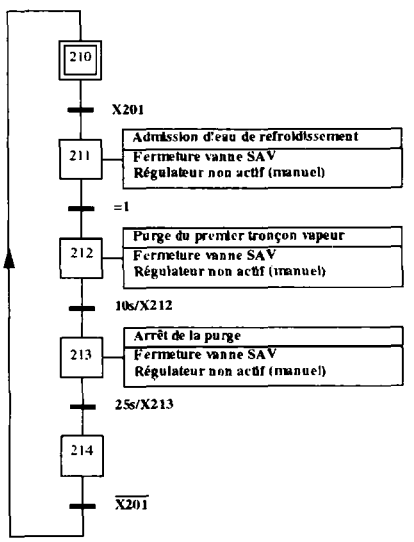
GS : *Grafcet de sûreté*



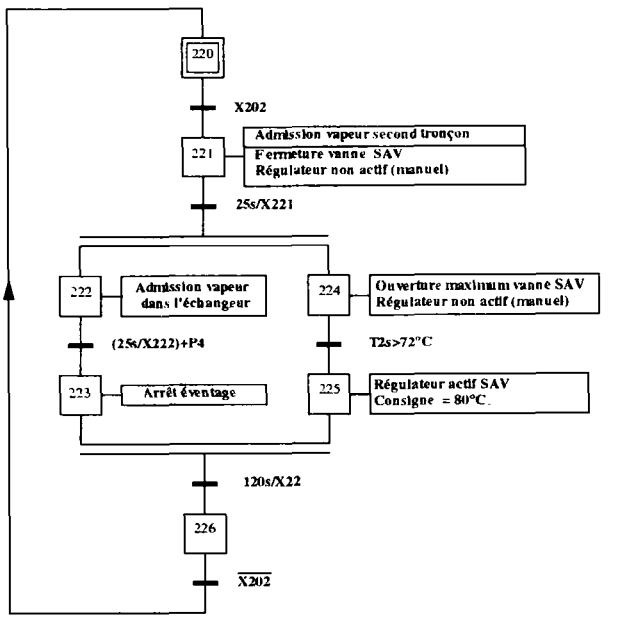
GC : *Grafcet de conduite*



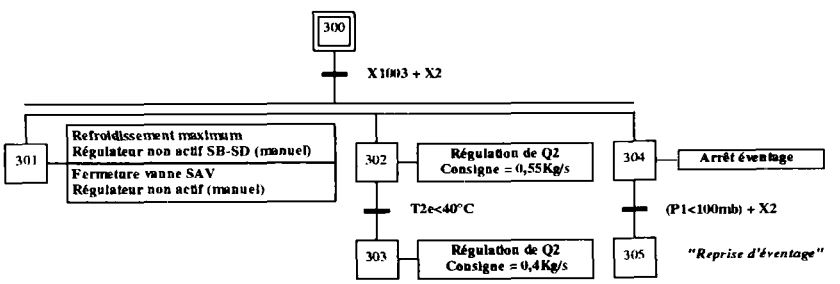
GF2 : *Grafcet de gestion du mode "Démarrage"*



GF2,1 : *Grafcet du fluide vapeur (phase 1 du démarrage)*



GF2,2 : *Grafcet du fluide vapeur (phase 2 du démarrage)*



GF3,D2 : *Grafcet de gestion du mode Mise à l'arrêt ou Défaillance*

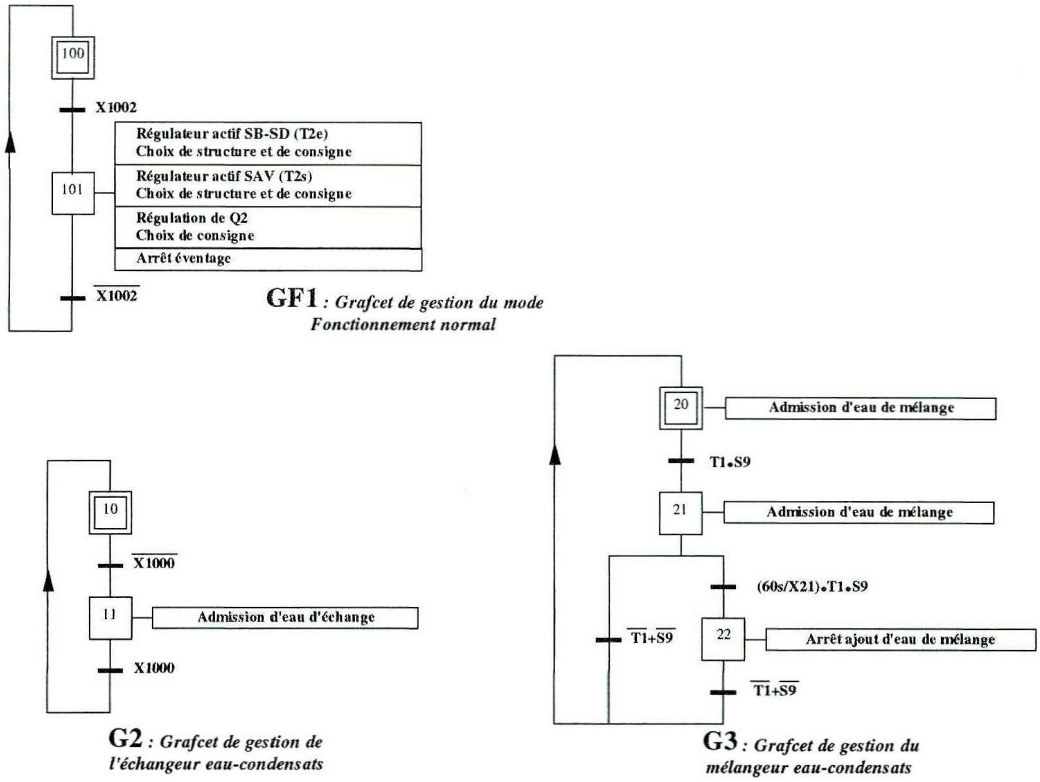


Figure 7-21 : grafcet fonctionnel complet issu du GEMMA.

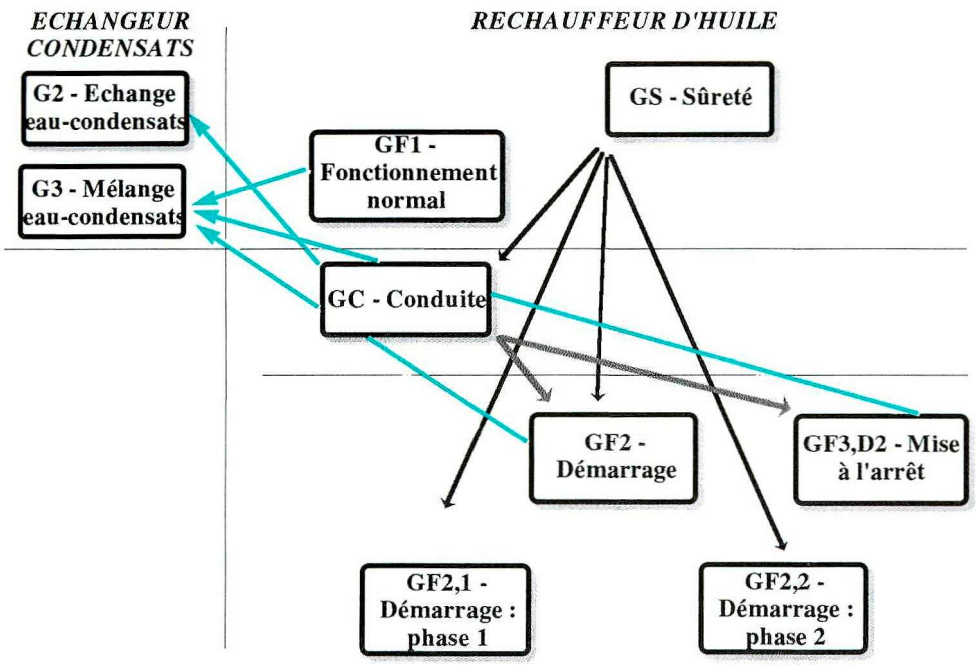


Figure 7-22 : hiérarchie entre les différents grafcets partiels

Le grafcet complet de l'installation nécessite le traitement des rejets ; ce dernier est conduit à partir de grafcets séparés notés **G2** pour la gestion de l'échangeur eau-condensats et **G3** pour la gestion du mélangeur eau-condensats, ceux-ci étant relatifs à un processus séparé pour lequel seuls les modes « arrêt » et « en fonctionnement » sont existants.

La détermination des rejets stables depuis 120s (2min) est assurée via une étape active (**X21**) dans le grafcet **G3** contrôlant le mélangeur eau-condensats.

Les hiérarchies de forçage sont reprises sur la figure 7-22.

On y note l'action du grafcet de sûreté et du grafcet de conduite. Les autres grafcets interagissent par synchronisation entre-eux.

7.2.6. Description du fonctionnement global

Ce qui suit rappelle le fonctionnement global de l'installation et met en évidence les diverses synchronisations existant entre les différents grafcets qui viennent d'être présentés.
Cette présentation est relative à une description Grafcet qui peut servir de base à l'implantation qui en sera faite sur un automate (voir paragraphe 3.2.2.1., point de vue partie commande).
Aussi, la table de transposition ci-après indique la fonctionnalité de chacune des sorties émanant de la partie commande.

Ordres normalisés	Fonction	Numéro du grafcet
S1	Purge premier tronçon vapeur	**GF2,1**
S2	Admission air comprimé détendeur	**GF2,2 GF3,D2**
S3	Échappement air comprimé détendeur	**GF2,2 GF3,D2**
S4	Admission air comprimé vanne Fischer	**GF2,2 GF3,D2**
S5	Admission eau échangeur auxiliaire	**GF2**
S6	Bascule avec S5	**GF2**
S7	Admission eau de mélange	**G3**
S9	Éventage	*Tout grafcet*
S10	Circuit eau échangeur auxiliaire	**G4**
S11	Admission eau d'échange	**G2**

Il faut aussi prendre en compte des commandes *« internes à l'automate »* liées au contrôle des blocs de régulation programmés nécessaires dans cette application:

Ordres normalisés	Fonction	Numéro du grafcet
SAV	Contrôle de la régulation **PID** de la vanne **SAV**	*Tout grafcet*
S5_S6	Contrôle de la régulation **PID** imposées aux vannes **S5** et **S6**	*Tout grafcet*
Non représenté	Contrôle de la régulation selon consigne imposée à **Q2** (pompe)	*Tout grafcet*

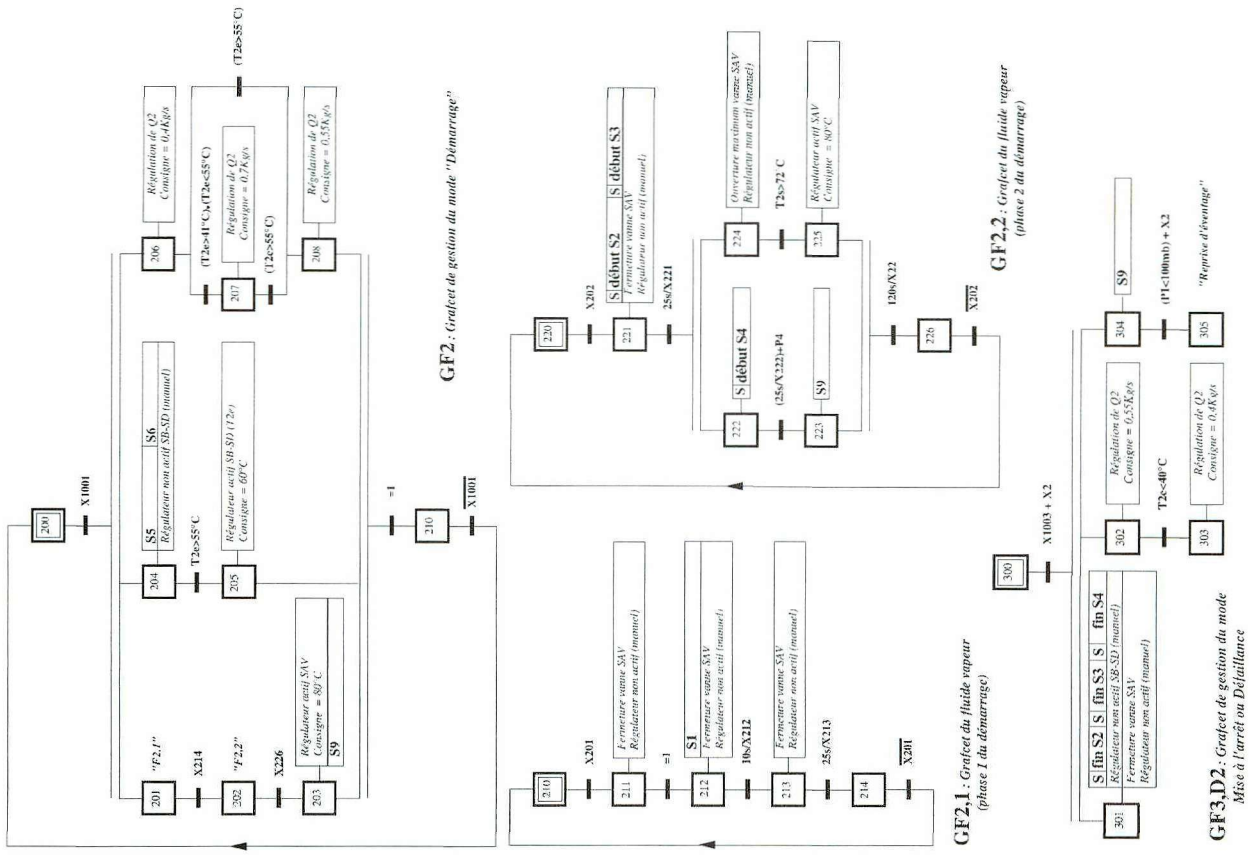
Au niveau des capteurs, on note la disponibilité des informations suivantes :

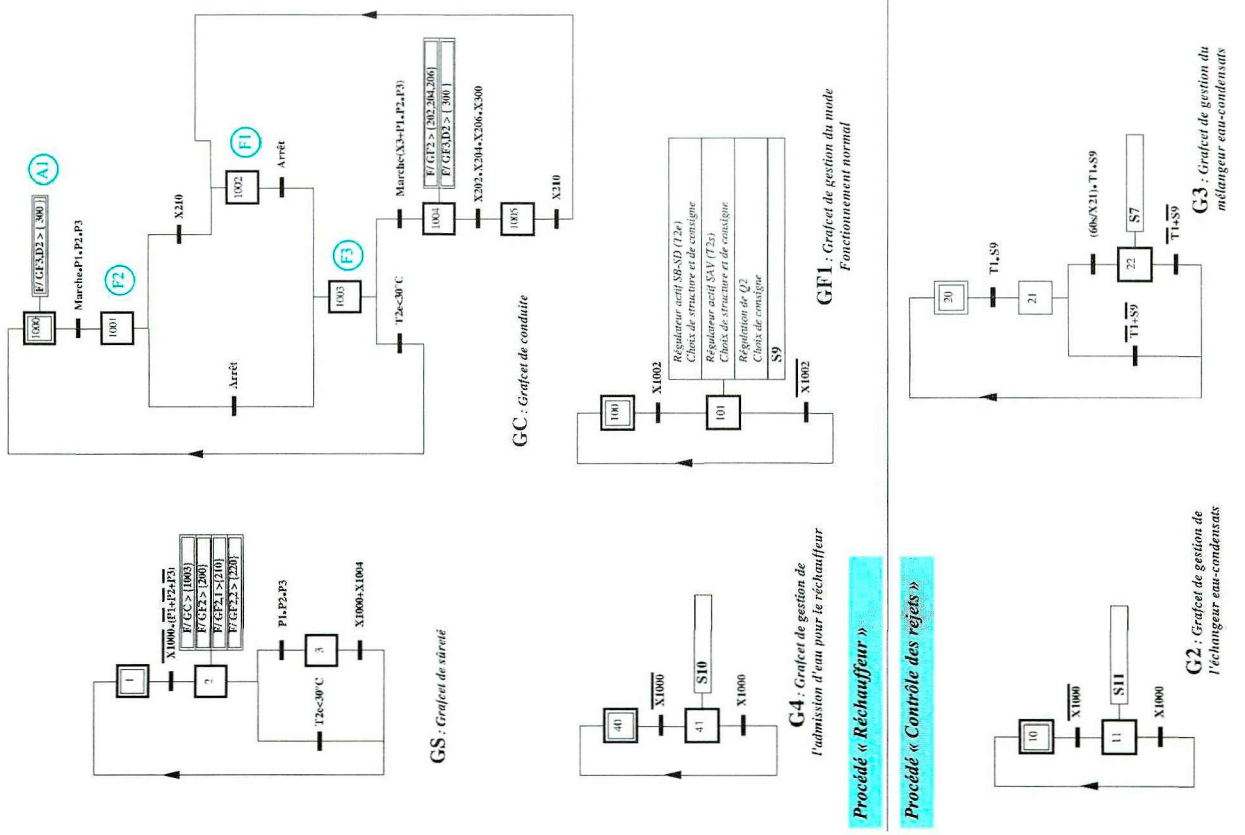
Capteur	Fonction	Numéro du grafcet
P1	Pression circuit vapeur suffisante	**GS-GC**
P2	Pression circuit eau suffisante	**GS-GC**
P3	Pression circuit air comprimé suffisante	**GS-GC**
P4	Pression échangeur principal suffisante	**GF2,2**
T1	Température de rejet condensats excessive	**G3**
T2e	Mesure température à l'entrée échangeur principal	*Tout grafcet*
T2s	Mesure température à la sortie échangeur principal	*Tout grafcet*
M1	Mesure pression dans l'échangeur principal	**GF2,1**

Commentaires :

Les grandeurs en italique représentent des informations analogiques qui seront traitées (conversion analogique/numérique) au niveau automate pour apparaître dans des expressions booléennes.

On notera l'introduction d'un grafcet **G4** qui assure le contrôle de la vanne d'admission d'eau au niveau du réchauffeur pour ne pas introduire sa commande dans le grafcet de conduite **GC**.


GF2 : Grafcet de gestion du mode "Démarrage"
GF2,1 : Grafcet du fluide vapeur (phase 1 du démarrage)
GF2,2 : Grafcet du fluide vapeur (phase 2 du démarrage)
GF3,D2 : Grafcet de gestion du mode Mise à l'arrêt ou Défaillance


GS : Grafcet de sûreté
GC : Grafcet de conduite
GF1 : Grafcet de gestion du mode Fonctionnement normal
G4 : Grafcet de gestion de l'admission d'eau pour le réchauffeur
Procédé « Réchauffeur »
G3 : Grafcet de gestion du mélangeur eau-condensats
G2 : Grafcet de gestion de l'échangeur eau-condensats
Procédé « Contrôle des rejets »

BIBLIOGRAPHIE

Livres

« Comprendre, maîtriser et appliquer le GRAFCET », M. BLANCHARD, CEPADUES Editions, Collection Automatisation et Production, 1979, 174 pages ;

« Le GRAFCET : sa pratique et ses applications », J.C. BOSSY, P. BRARD, P. FAUGERE, C. MERLAUD, EDUCALIVRE, 1980, 144 pages ;

« Le GRAFCET : de nouveaux concepts », GREPA, CEPADUES Editions, Collection Automatisation et Production, Décembre 1985, 104 pages ;

« Les automatismes programmables », D. BOUTEILLE & Coll., CEPADUES Editions, Collection Automatisation et Production, 2e édition, 1987, 174 pages ;

« Du GRAFCET aux réseaux de Petri » R. DAVID, H. ALLA – Editions HERMES, Traité des Nouvelles Technologies, Série Automatique, 2e Edition revue et augmentée – Novembre 1992 – 500 pages ;

« Le GRAFCET », Groupe G7W – CEPADUES Editions, Collection Automatisation et Production, 2e Edition, 1995, 144 pages.

Articles, actes de congrès, fascicules

« Pour une représentation normalisée du cahier des charges d'un système logique », AFCET, Revue Automatique et Informatique Industrielles, n° 61 et 62, novembre-décembre 1977 ;

« Le Grafcet » brochure ADEPA – avril 1979 ;

« Le Grafcet : nouvelles évolutions et aspects normatifs » B. FROMENT, D. GENDREAU, Actes des 9èmes Journées Robotique et Productique, Saint-Etienne, Maison de la Productique, 3 et 4 décembre 1991 ;

« Grafcet : théorie et applications », Actes du congrès GRAFCET'92, AFCET, 25 et 26 mars 1992, 228 pages ;

« Conception des Systèmes Automatisés de production : techniques d'élaboration et d'évaluation d'un GRAFCET. Etude et prédiction de son comportement dynamique », Recueil de documents Université d'été 1993 – AFCET/ENS de Cachan, 8 au 13 Juillet 1993, 195 pages.

Normes et documents de référence

« Diagramme fonctionnel GRAFCET pour la description des systèmes logiques de commande », Norme Française NF C03-190, Juin 1982, 30 pages ;

« Etablissement des diagrammes fonctionnels pour systèmes de commande / Preparation of function charts for control systems », Norme Internationale / International Standard, CEI/IEC 848, 1988, 99 pages ;

« Établissement des diagrammes fonctionnels pour systèmes de commande – Diagramme fonctionnel GRAFCET. Extension des concepts de base » Documentation de référence (Documentation et symboles graphiques) UTE C03-191, Juin 1993, 35 pages ;

« Automates programmables – Partie 3 : Langages de programmation », Norme Française et Norme Européenne NF EN 61131-3, CENELEC ; Version française de la norme CEI/IEC 1131-3, Juillet 1993, 202 pages.

Didacticiel

« GRAF7-C », B. DIMA, M. MANKA, Québec, éditeur-simulateur de Grafcet ;

« Parcours Interactif pour Découvrir le Grafcet », R. LE GOFF, CRDP de Basse-Normandie, 1994.

Messages
111, rue Nicolas-Vauquelin – 31100 Toulouse
Tél. : 05 61 41 24 14