

N° D'ORDRE : 1147

50376
1993
189

THESE

50376
1993
189

**L'UNIVERSITE DES SAUVAGES ET TECHNOLOGIES DE
TOURNER
LILLE**

pour obtenir le grade de

DOCTEUR DE L'UNIVERSITE

en

PRODUCTIQUE : AUTOMATIQUE ET INFORMATIQUE INDUSTRIELLE

par

Michard Pierre RAKOTOSON

**SYNTHESE DES CARACTERISTIQUES ET TECHNIQUES
DE DEVELOPPEMENT DE LA COMMANDE DES
SYSTEMES DIS-CONTINUS :**

Application aux Systèmes de Production Flexibles Batches



Soutenu le 07 Juillet 1993 devant la Commission d'Examen

Membres du jury :	M. BAYART	Examineur
	M. STAROSWIECKI	Examineur
	C. VERCAUTER	Examineur
	J. C. GENTINA	Président du Jury
	F. LHOTE	Rapporteur
	Y. QUENEC'H DU	Rapporteur

Directeurs de travail : J.C. GENTINA, C. VERCAUTER

Thèse préparée au laboratoire LAIL / Ecole Centrale de Lille, URA CNRS D 1440

*A la famille RAKOTOSON
ET
RANDRIANANJA.*

AVANT-PROPOS

*Le travail présenté dans ce mémoire a été effectué au **Laboratoire d'Informatique Industrielle de Lille (L.A.I.L.)** sous la direction scientifique de Monsieur **J.C. GENTINA**, Professeur à l'Ecole Centrale Lille. Je tiens à le remercier particulièrement de m'avoir accueilli dans son laboratoire de recherche et de m'avoir aidé tant sur le plan scientifique, moral que financier tout au long de ce travail.*

Je suis très reconnaissant à :

*Monsieur **F. LHOTE**, Professeur à l'Université de Franche-Comté,*

*Monsieur **Y. QUENEC'H DU** Professeur à l'Ecole Supérieure d'Electricité de Rennes, et animateur principal du groupe de travail AF CET/SEE sur le thème des "Systèmes Dynamiques Hybrides (ex-Systèmes Dis-Continus)",*

de l'honneur qu'ils me font en acceptant de juger ce travail et d'être les rapporteurs de cette thèse.

Je tiens également à remercier :

*Monsieur **M. STAROSWIECKI**, Professeur à l'Université de Lille I (USTL),
Directeur de l'A.R.E.M.I*

*Madame **M. BAYART**, Maître de conférences à l'Ecole Universitaire d'Ingénieurs de Lille (EUDIL),*

*Monsieur **C. VERCAUTER**, Maître de conférences à l'EC Lille*

pour l'honneur qu'ils me font en participant à mon Jury de Thèse.

*Je suis très reconnaissant à Monsieur **C. VERCAUTER**, Maître de conférences à l'EC Lille, pour la patience et le soutien qu'il a eus à mon égard pendant l'encadrement de ce travail.*

Qu'il me soit permis ici de rendre hommage à tous les membres du L.A.I.L., pour l'aide précieuse qu'ils m'ont apportée tant sur le plan scientifique que sur le plan humain. Permettez moi de remercier individuellement :

- *Monsieur L. LECONTE, Ingénieur au L.A.I.L / EC LILLE, qui m'a aidé dans la réalisation du contrat OPERA entre CEGELEC et le laboratoire L.A.I.L . / EC LILLE,*
- *Monsieur E. CRAYE, Maître de Conférences à Centrale Lille, pour l'aide qu'il m'a apportée dans la connaissance de la station de travail VAXStation et pour son intervention dans le groupe de réflexion sur les "Systèmes Dynamiques Hybrides".*

Je remercie également Madame DUPLOUICH et ses collaboratrices du Centre de Documentation d'EC Lille, pour l'aide précieuse qu'elles m'ont apportée dans mes recherches bibliographiques. Enfin, je remercie très sincèrement Monsieur VANGREVENINGE qui a assuré la reprographie de ce mémoire.

SOMMAIRE

INTRODUCTION GENERALE	Page 11
<u>CHAPITRE I</u>	Page 15
UNITES AUTOMATISEES DE PRODUCTION ET SYSTEMES DIS-CONTINUS	
<u>CHAPITRE II</u>	Page 55
CARACTERISATION DES SYSTEMES DE PRODUCTION A ETATS CONTINUS - DISCRETS ET IDENTIFICATION DES STRUCTURES DE COMMANDE	
<u>CHAPITRE III</u>	Page 114
REALISATION DE COMMANDES INTRA-UNITES	
<u>CHAPITRE IV</u>	Page 160
PROPOSITION D'UNE METHODE DE CONCEPTION DES COMMANDES INTER-RESSOURCES BATCHS	
CONCLUSION GENERALE	Page 186
ANNEXES	Page 189
BIBLIOGRAPHIE	Page 210
TABLE DES MATIERES	Page 220

INTRODUCTION GENERALE

INTRODUCTION GENERALE

Pour maîtriser la fabrication de petites séries, les industriels sont amenés à adapter leurs moyens de production aux spécificités des produits. La flexibilité du système automatisé de production devient alors un concept de réussite qui doit se conjuguer avec des stratégies de fonctionnement telles que la réduction des coûts de fabrication, le respect des dates de livraison, etc.

Ces objectifs d'origine économique ont été bien interprétés sur le plan de l'amélioration de performance des moyens matériels de production, grâce notamment à l'introduction de la haute technologie apportée par l'électronique et l'informatique. De ce fait, il est rapidement apparu le besoin de méthodologie de conduite de projet d'automatisation des systèmes de production flexibles (SPFs).

Dans le cadre de **la conception du système de commande** d'un SPF, assurer la flexibilité peut se traduire par la conciliation d'activités à objectifs assez contradictoires. Par exemple, le temps d'un cycle de fabrication représente une période au cours de laquelle le système de commande doit accomplir simultanément les fonctions de surveillance des variations des grandeurs physiques de transformation, de gestion de l'enchaînement des opérations de traitement, de gestion de modes de marche et d'arrêt et de reconfiguration des machines. Le problème à appréhender réunit par conséquent des difficultés de nature diverse.

Les moyens techniques de l'automaticien proviennent fondamentalement de l'Automatique des Systèmes à Etats Continus (SECs) et de l'Automatique des Systèmes à Evénements Discrets (SEDs).

L'Automatique des SECs propose des outils théoriques formels d'analyse, de modélisation et de contrôle. Leur application est éprouvée dans l'étude d'**évolution continue** dans le temps de grandeurs représentatives de l'état d'un système. Les grandeurs observées sont de **nature analogique** telles que les paramètres d'un phénomène physico-chimique ou de

flux continu de matière à transformer. Les techniques déployées sont généralement issues des principes d'asservissement ou de régulation mettant en œuvre des fonctions de transfert et des équations d'état.

L'Automatique des SEDs s'intéresse à la **dynamique d'un système conditionnée par l'occurrence d'événements**. La sensibilité aux événements est alors définie par des conditions sur les valeurs des **grandeurs ou d'expressions logiques**. La représentation d'états de tels systèmes est basée sur des modèles de type états discrets/transitions tels que les Automates à états finis, les réseaux à files d'attente, les réseaux de Petri ou le Grafocet. Cette modélisation peut être complétée, lorsqu'apparaissent des problèmes de prises de décisions, par des mécanismes de raisonnement à base de règles. L'analyse des propriétés du modèle obtenu fait souvent appel à la théorie des graphes.

Le concepteur d'un système automatisé de production est amené, selon le point de vue adopté et la nature du système physique de production, à opter pour l'un des deux aspects de l'Automatique : Continue ou Événementielle. Cependant privilégier la nature continue ou événementielle d'un procédé n'est plus dorénavant une approche satisfaisante dès lors que des interactions permanentes ou des imbrications entre les deux aspects régissent l'évolution de son état. Caractéristique des systèmes dits "dis-continus" (à états continus et à événements discrets), cet aspect mixte incite à entreprendre une nouvelle démarche fondée sur la **considération globale** du système [BOU87] et sur l'**intégration des techniques de l'Automatique** pour mener à bien le développement de l'automatisme de commande.

Dans son ensemble, notre travail s'inscrit dans ce nouveau thème de recherche. L'orientation de notre travail, conforme aux intérêts portés par notre équipe au sein du Laboratoire d'Automatique et d'Informatique de Lille (LAIL) sur la méthodologie de Conception Assistée pour les Systèmes de Production Automatisés en Industries Manufacturières (CASPAIM) [CAS87], [BOUR88], [KAP88], [CRAY89], [GAS89], [CRU91], [AMAR92], reste focalisée sur les systèmes automatisés de production. Cette étude s'est alors engagée suivant une idée directrice consistant à **envisager les possibilités d'une transposition adaptée du savoir-faire acquis du projet CASPAIM dans le domaine de la conception de la partie commande de système flexible à états continus et à événements discrets**. Afin d'être en mesure d'énoncer des hypothèses de transposition et, par la suite, de proposer une méthode adéquate, le manque de connaissances sur les systèmes à états continus et discrets nous a conduit à élaborer une première analyse de caractérisation. Ceci nous a permis d'orienter plus particulièrement notre travail vers les systèmes automatisés de production à traitement par lots ou systèmes batchs.

Les résultats de ces études sont synthétisés dans ce mémoire qui comporte quatre chapitres :

- le premier chapitre rappelle les principes généraux concernant la conception du système de commande et présente les caractéristiques spécifiques des systèmes discontinus.
- le deuxième chapitre effectue une typologie de systèmes de production basée sur l'analyse des éléments prépondérants (produit, ressources, processus de fabrication et leur dynamique) par leur contribution dans la conception de la partie commande. Une catégorie de systèmes à états continus et discrets dont fait partie notamment les systèmes batchs, se distingue par la possibilité d'une structuration en commandes locales d'unités et de ressources physiques (**les commandes intra-ressources**) paramétrées et assujetties par un niveau supérieur de commandes de coordination et de pilotage (**les commandes inter-ressources**). Ce dernier niveau de commandes inter-ressources présente des conditions propices à l'idée de transposition des approches de conception orientée "produit" telles qu'elles sont définies dans la méthodologie CASPAIM.
- le troisième chapitre, consacré aux commandes intra-ressources, propose une **méthode de développement des commandes locales** d'unités de transformation. Elle est supportée par un outil d'assistance et de génération d'automatisme que nous avons développé en collaboration avec la Division Contrôle-Bailey de la société CEGELEC.
- le quatrième chapitre explicite les hypothèses que nous avons prises afin de permettre une transposition adaptée aux spécificités des systèmes batchs. La **méthode transposée pour la conception des commandes inter-ressources batchs** y est alors développée sur la base d'exemple réel de la préparation par lots.

CHAPITRE I

CHAPITRE I

UNITES AUTOMATISEES DE PRODUCTION ET SYSTEMES DIS-CONTINUS.

I.1 - GENERALITES

Les premières préoccupations au cours de la modernisation des moyens de production se sont portées essentiellement sur l'automatisation individuelle de chaque unité de transformation des lignes de production. Des facteurs de rentabilité ont incontestablement été améliorés pendant cette étape. On peut les interpréter en termes d'augmentation de la qualité de la transformation, d'adaptabilité de traitement à la demande du produit, et d'anoblissement de la fonction de l'opérateur.

Ces performances n'auraient été réalisées sans l'introduction des systèmes automatisés de conduite appelés également Systèmes Automatisés de Production (SAP).

Ces systèmes comprennent l'ensemble des moyens matériels et logiciels constituant la partie automatisme, communication et exploitation de l'installation. Ils représentent la partie "intelligente" du système de fabrication dans la mesure où ils peuvent formuler une réponse à toute sollicitation externe. Leur champ d'action s'étend depuis les points de prise d'informations du procédé (capteurs) jusqu'aux interfaces avec les services généraux tels que la gestion technique (méthode, planification), en passant par les calculateurs et les automates programmables industriels d'élaboration et de transfert de commandes. Ils reçoivent des informations et des ordres de fabrication qu'ils traduisent :

- par la régulation des grandeurs physiques,
- par l'enchaînement d'opérations élémentaires qui vont alors agir sur les composants actifs de l'unité (actionneurs).

Une unité automatisée de production (fig.1.1) peut être caractérisée par :

- la **Partie Opérative** ou **Procédé**, qui regroupe les éléments physiques des moyens matériels entrant en contact et œuvrant sur la matière à transformer : conduits d'amenée, équipements de transformation, pompes, vannes, cuves, etc.
Le couple (actionneurs/capteurs), interface de la commande, est souvent confondu dans cette partie.

- la **Partie Commande** se charge d'élaborer des ordres, conformes aux consignes de production et à l'état du procédé, à destination des actionneurs.

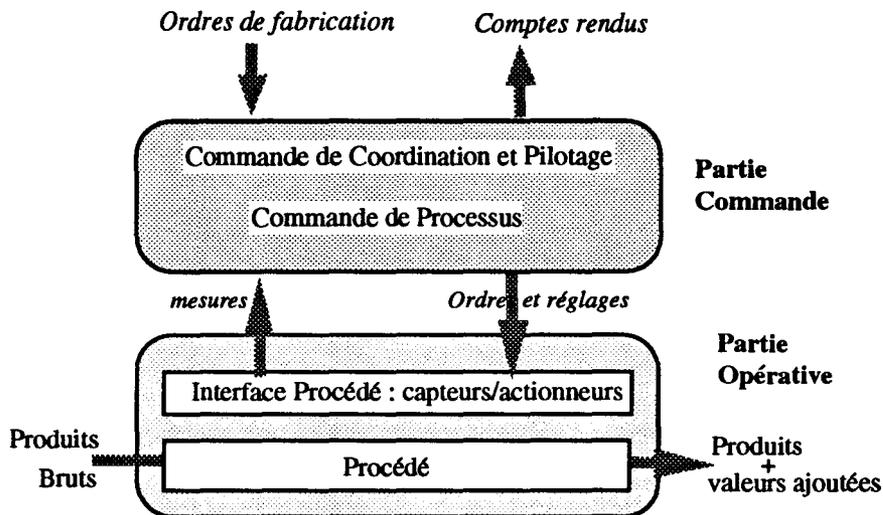


fig.1.1 - Modèle hiérarchique d'un Système Automatisé de Production.

I.1.1 - Description d'une unité de production - Partie Opérative.

La spécification d'une unité de production requiert des connaissances issues de divers domaines. Ainsi les explications des phénomènes "physico-chimiques" qui régissent l'évolution des opérations de transformation comme :

- le transfert de masse au cours d'une fermentation,
- la séparation d'une matière brute en ses composants élémentaires dans une colonne à distiller,
- le mélange et la réaction d'un certain nombre de réactifs pour obtenir un produit de synthèse dans un réacteur chimique,

nous viennent du génie des procédés. Les modes opératoires de marche/arrêt, les conditions de fonctionnement et de sécurité, la structure et l'implantation du procédé relèvent du savoir-faire du bureau de méthode.

Une meilleure compréhension d'une installation industrielle passe nécessairement par sa décomposition en un certain nombre de sous-ensembles plus faciles à discerner. L'objectif principal de cette démarche est de réduire la complexité du système de départ afin d'aboutir à des entités élémentaires moins complexes et bien identifiées. Divers critères peuvent être envisagés pour effectuer cette analyse descendante, se rapprochant souvent des directives relevant de la méthode SADT [ROS77], selon les finalités visées par l'étude, comme par exemple :

- la disposition géographique des constituants de l'unité,
- la spécificité d'un équipement,
- la dépendance fonctionnelle et/ou structurelle des sous-ensembles.

En utilisant le critère fonctionnel, une installation de distillation de liquide A pour obtenir deux produits B et C, et les résidus (fig.1.2), par exemple, peut être décrite par les éléments suivants :

- un premier niveau représente l'unité de distillation dont la fonction consiste à séparer le liquide A en produits B, C et les résidus.
- un second niveau de description décompose l'unité de distillation en trois sous-systèmes : le rebouilleur, la colonne et le condenseur.
- un troisième niveau détaille chaque sous-système du niveau 2 en éléments plus simple. La colonne est ici décomposée en : corps de colonne, vanne 100 (soutirage résidu), vanne 120 (alimentation).

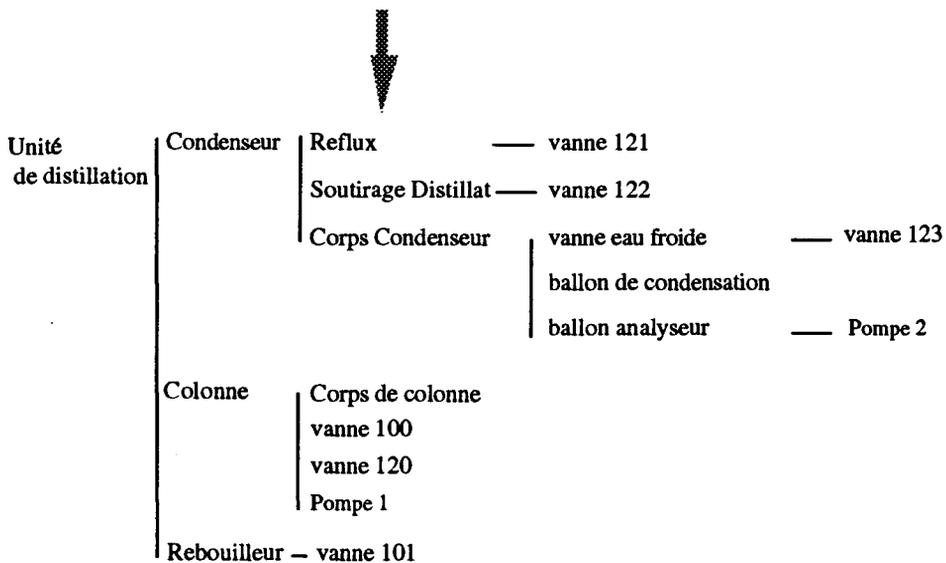
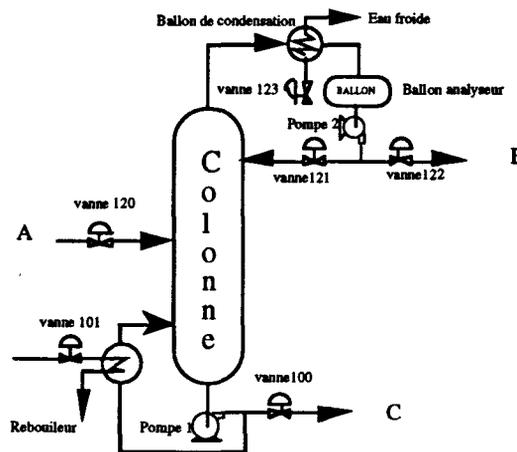


fig.1.2 - Décomposition fonctionnelle en objets actifs.

Cette représentation fonctionnelle de la partie opérative est particulièrement intéressante, par exemple, pour l'élaboration de l'arbre de défaillance exploitée dans la recherche des sources de panne des différents sous-systèmes. Elle est toutefois d'un intérêt moindre pour la conception de la partie commande.

Le Plan de Circulation des Fluides (P.C.F.) ou le plan de flux (flow sheet) est une représentation schématique de la partie opérative plus appropriée à des fins de conception de la commande. Elle est établie à partir d'un ensemble de symboles graphiques standards [ISA73] et est accompagnée du Plan d'Instrumentation Détaillé (P&ID : Process and Instrumentation Diagram). Une documentation sur les codes de repérage et les caractéristiques technologiques explicite chaque élément du P.C.F. : table de localisation d'installation, liste des données techniques et symboles d'identification des instruments. La figure (fig.1.3) décrit un P.C.F. correspondant à l'unité de distillation. Le même critère fonctionnel peut être utilisé pour une décomposition en boucles élémentaires de commande.

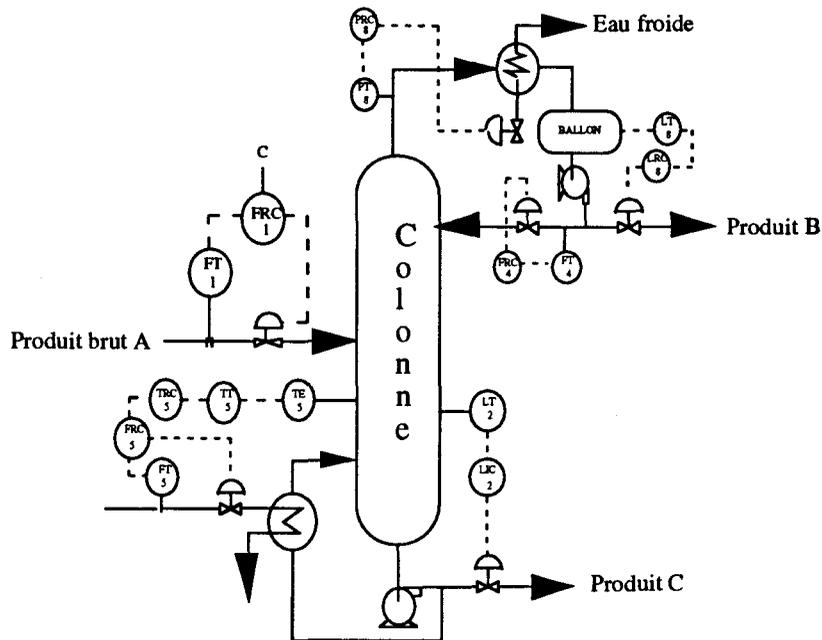


fig.1.3 - Exemple d'un P.C.F. d'une unité de distillation.

I.1.2 - Description d'un système de conduite - Partie Commande.

Le système automatisé de conduite doit répondre à des exigences liées à divers aspects tels que la dynamique du processus à commander (contraintes temps réel), la sécurité du matériel, du produit, de l'opérateur, et de l'environnement, la crédibilité des informations et des

ordres, les politiques stratégiques traduisant les besoins de l'opérateur (convivialité du dialogue homme-machine) et de l'industriel (intégration des fonctions d'optimisation).

Sa principale activité est le **maintien** du fonctionnement normal du processus confronté à des phénomènes perturbateurs. Cet objectif se réalise par deux fonctions classiques :

- fonction de **contrôle** : observer l'état réel du processus, comparer avec l'état souhaité et prendre une décision corrective pour annuler ou minimiser l'écart.
- fonction de **commande** : agir, dans les limites de temps imposées, sur les actionneurs pour rendre effectives les décisions prises.

De nouvelles missions se sont ajoutées à cette fonction classique de contrôle/commande. Elles marquent l'évolution du système de conduite [REN92] vers un système plus complet, plus sophistiqué intégrant la maintenance, le traitement de données de laboratoire, l'expertise des données d'exploitation.

I.1.2.1 - Évolution de la structure du système de commande.

Une architecture du système de commande est établie selon la complexité des fonctions à réaliser. On distingue souvent les structures de commande suivante :

Commande Centralisée.

Les traitements de contrôle/commande sont centralisés au sein du même équipement (fig.1.4a). On rencontre ce type d'architecture dans des installations anciennes. Il est adapté aussi pour la commande d'unités simples. La liaison de la partie commande avec chaque élément actif de la partie opérative se fait fil à fil et en parallèle. Ses inconvénients majeurs résident dans la faiblesse de la disponibilité du système de commande et de la communication inter-processus.

Commande répartie.

La répartition de la commande devenue possible grâce à la haute technicité des équipements de traitement, des moyens de communication et à la banalisation de l'information (instauration des standards), a permis de dupliquer les fonctions d'un système de commande sur un certain nombre de calculateurs de même niveau (fig.1.4b). Chaque calculateur est alors affecté au contrôle/cômmande d'un sous-processus et, la communication inter-calculateur permet de coordonner l'ensemble. Le premier avantage de cette structure est la limitation de la propagation de défaillance d'un équipement. Par contre, elle souffre de la concentration de la fonction de communication qui pourrait être pénalisante.

Commande distribuée et hiérarchique.

L'arrivée des contrôleurs programmables modulaires et des réseaux de communication industriels a révolutionné la structure de la commande conduisant à une structure arborescente constituée de modules de traitement indépendants (fig.1.4c). Chaque module nœud (équipement) est dédié à une fonction spécialisée de la chaîne de traitement de l'information depuis l'ordre de lancement en fabrication émanant du plan de production jusqu'aux échanges de signaux avec les capteurs/actionneurs. Les échanges du type "objectifs à atteindre/comptes rendus d'exécution" caractérisent la relation de coordination entre deux niveaux hiérarchiquement immédiats. La liaison entre équipements de même niveau hiérarchique doit cependant être possible pour un fonctionnement synchronisé et coopérant.

Cette organisation de la commande offre actuellement une meilleure disponibilité que les précédentes. La solution redondante (duplication des nœuds et des bus de communication) est toutefois pratiquée pour assurer les fonctions vitales de l'exploitation ou pour améliorer la sûreté de fonctionnement.

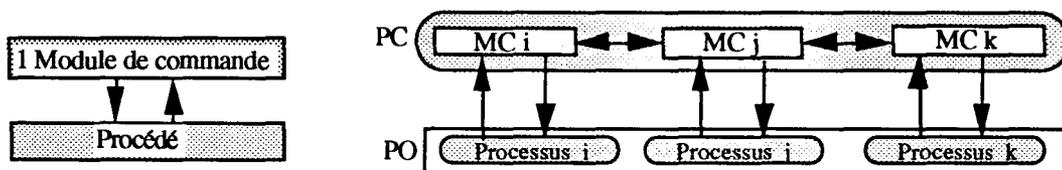


fig.1.4a et 1.4b - Architecture de commande centralisée et répartie.

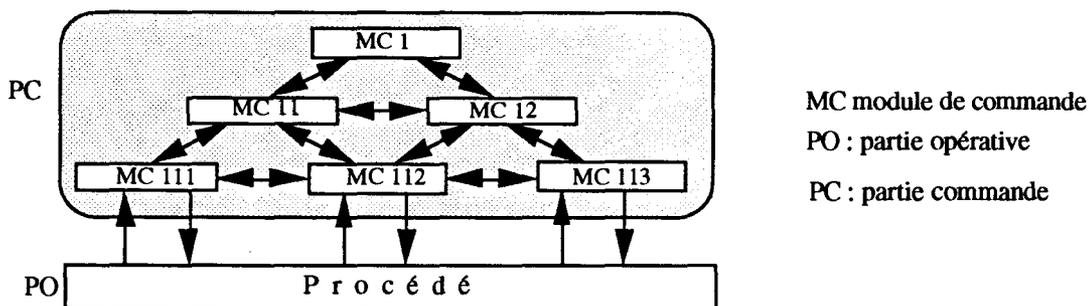


fig.1.4c - Architecture de commande hiérarchisée et distribuée.

I.1.3 - Architecture fonctionnelle d'un S.A.P.

Les activités d'un système de commande peuvent être décrites selon une hiérarchie de fonctions sur des horizons temporels différents. Quatre niveaux sont généralement à distinguer. Chaque niveau est identifié à une classe de traitements, à un type d'équipement et de réseau de

communication, et à des données bien spécifiques. Nous décrivons succinctement les tâches de chaque niveau :

Niveau 0. Fonctions : Acquisitions, conversions et prétraitements des signaux.

La scrutation périodique ou à la demande des interfaces procédé permet de mettre à jour la base de données temps réel qui retrace l'évolution de l'état de la partie opérative. Des opérations de mise en forme par amplification, mise à l'échelle, filtrage, numérisation sont généralement effectuées sur des grandeurs physiques brutes.

Niveau 1. Fonctions : Régulations locales et automatismes réflexes.

Il s'agit ici de maintenir le fonctionnement dynamique d'une partie du procédé selon les consignes imposées par les niveaux supérieurs. La génération d'actions réflexes doit obligatoirement respecter une contrainte de temps faute de quoi la commande perd son contexte d'exécution. La fonction traitement est ainsi très limitée en nombre de paramètres à gérer (régulation d'un paramètre : régulateur à action Proportionnelle Intégrale et Dérivée (PID) de niveau, de débit, de température,...) et en temps de réponse.

Niveau 2. Fonctions de régulation à coopération multivariable et fonction d'optimisation.

Les commandes de ce niveau jouent le rôle de fédérateur d'un certain nombre de modules de commande du premier niveau. Elles sont amenées à gérer aussi bien des paramètres de fonctionnement normal (débit, température, pression, niveau, etc.), de stratégies de fonctionnement (algorithme de prédiction, mesures d'anticipation sur l'évolution des dérivées et actions d'autoadaptation ou d'autoréglage des paramètres de fonctionnement), que des critères dynamiques d'optimisation (minimisation de la consommation d'énergie, du temps opératoire, maximisation des facteurs de qualité et de productivité). La commande est fortement multivariable et met en œuvre des traitements algorithmiques à temps de réponse supérieur à celui du niveau 1.

Niveau 3. Fonctions de conduite globale : Supervision, Surveillance et Interface.

Ce niveau de commande, souvent centralisé, exploite les données de synthèse relevant des résultats d'exécution des commandes des niveaux précédents. Il représente aussi l'interface de la commande d'une unité de production avec les niveaux hauts tels que la coordination inter-unités, le niveau planification et ordonnancement. En fait, il comporte les noyaux logiciels, intégrateurs du système de conduite.

Dans ce niveau, la surveillance commence par la détection au plus tôt des anomalies de fonctionnement. La localisation des défaillances et la recherche de leurs causes conduisent à l'activation des opérations de maintenance.

La supervision comporte de multiples fonctions complémentaires telles que : animation de synoptique, gestion d'historique, analyse statistique, report des résultats d'exploitation vers d'autres services de l'entreprise. Cette fonction offre à l'opérateur une vue synthétique de l'unité pour mieux appréhender le suivi en temps réel de la production, la gestion des modes marches/arrêts et la prise de décision face à des situations conflictuelles.

Le tableau de la figure 1.5 résume sur l'exemple d'un four de traitement thermique les fonctions de différents niveaux de commande précédemment évoquées.

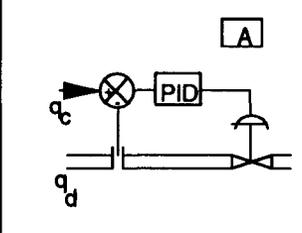
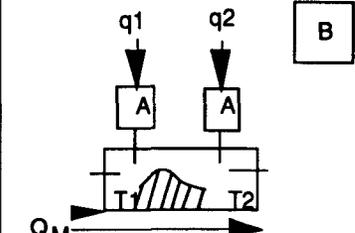
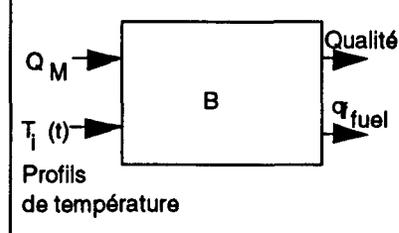
		NIVEAU 0	NIVEAU 1	NIVEAU 2	NIVEAU 3
Variables d'état	Consignes	Débits combustibles, ...	Température, pression, niveau, ...	Qualité, quantité, ...	
	Actions	Vannes, ...	Débit combustible, ...	Temps, pression, Niveau, ...	
	Perturbations	Atelier amont, ...	Fuites, entrées parasites, ...	Changement de qualité, ...	
Régulation	Nature	Régulateurs PID	Régulateurs PID, numériques, DDC	Régulateurs numériques, Optimisation, programmation dyn.	
Commande	Contraintes	Limites de Puissance	Contraintes absolues ou gradients	* Contraintes absolues éventuellement non linéaires	
	Objectifs	Stabilité et temps de réponse	Minimisation de la variance de l'écart mesure - consigne	Optimisation d'un critère écon.	
Echelle de temps		Secondes, Réaction réflexe	Minutes	Minutes, heures	* Semaines, mois
Méthodologie type		P.I.D, Automate	Modélisation dynamique de représentation Commande multivariable	* Modélisation physique, statistique et dynamique * Commande multivariable avec contraintes	* Ordonnancement * Recherche opérationnelle * Optimisation linéaire ou non linéaire
Composants		Capteurs actionneurs	Automates, Régulateurs Régulation du sous-processus	Automates, S.N.C.C Superviseurs	* Calculateurs de processus et industriel
But		Servitude Maîtrise des signaux primaires de commande	Maîtrise dynamique des variables définissant la marche du processus	* Régulation du produit * Optimisation de la marche du processus de fabrication	* Planification, * Répartition spatiale et temporelle des charges
Exemple : Four de traitement thermique					Pour chaque consigne, fixer un objectif de : - qualité - quantité (à une date fixée)

fig.1.5 - Structure hiérarchique de la partie commande[RICH84].

Ainsi, la description d'un système automatisé d'unité de production que nous avons essayé de présenter précédemment ne reflète que les caractéristiques générales. En effet, le choix d'une architecture et de sa technologie doit être avant tout une réponse satisfaisante aux besoins de la fabrication qui sont, à priori, spécifiques à chaque installation.

I.1.4 - Démarche de réalisation d'automatisme de conduite

Entreprendre un projet d'envergure concernant l'automatisation d'une unité de production demande pour une entreprise moderne non seulement des investissements conséquents mais aussi la mobilisation des compétences du personnel.

Plus précisément, le métier de concepteur de système automatisé de production conduit à la question : "Comment faut-il procéder pour aboutir à une réalisation spécifique en état de fonctionnement et répondant à toutes les caractéristiques demandées ? ". Les difficultés de réalisation existent sous différentes formes :

- la diversité des techniques de réalisation: le domaine technique est très étendu (informatique, électronique, problèmes d'industrialisation, ...). Les techniques évoluent et se diversifient actuellement très vite.
- les échanges et les dialogues avec le client : savoir interpréter correctement les attentes du client qui sont exprimés habituellement en langage naturel, donc sujet à de multiples interprétations.
- les complexités relevant de la gestion de projet de taille importante et de longue durée, de la gestion de ressources humaines, de l'organisation du travail en équipe puis de la cohérence de l'ensemble.

Le besoin de méthode d'approche se fait sentir immédiatement pour faire face à ce problème. L'apport d'une méthodologie au cours du cycle de vie d'une application présente de multiples avantages :

- garantie d'obtention de résultats conformes au cahier des charges.
- gain de temps de développement, respect de l'échéance de développement donc réduction de coût,
- réduction des erreurs, facilité de mise en œuvre, facilité d'évolution et de maintenance donc qualité assurée,
- intégration facile dans un système plus vaste.

La démarche classique d'approche préconise une séquence de trois phases principales :

Phase de Spécifications.

Première étape délicate mais essentielle, elle traduit les besoins exprimés en une description **externe** du système. Établie par itérations progressives, elle doit comporter les données **satisfaisantes** pour le développement du projet d'automatisation.

La formalisation des données brutes émanant du client est une nécessité vitale. Elle doit aboutir à une description vérifiable qui doit être sanctionnée par une validation mutuelle. Les efforts de formalisation consacrés à cette étape consolident le bon fondement des données de départ pour ne plus les remettre en question pour le reste du développement où le coût des corrections des erreurs de spécification devient prohibitif.

La démarche de spécification pour transformer le cahier de charges en spécifications validées et exploitables comporte essentiellement des opérations :

- d'analyse : il s'agit de délimiter le champ d'étude et de discerner de manière systématique toutes les facettes que peut avoir le système étudié en se livrant à une chasse aux oublis, aux ambiguïtés sources de divergence d'interprétation,
- de structuration et de modélisation : il s'agit de ne retenir que les informations pertinentes puis de les structurer par des relations de regroupement. Le recours à des langages plus ou moins formels (graphique, textuel, pseudo-code) et à des modèles externes qui font abstraction de la structure interne (modèle orienté objet : encapsulation ; modèle transformationnel : entrée/sortie; modèle relationnel : entités/relation; modèle comportemental : stimuli/réponses) favorise la description explicite et détaillée.
- de vérification et de validation : la validation assure la réduction de la complexité en conception et en exploitation. Elle peut s'effectuer par :
 - a - simulation, on lui reproche souvent de ne pas être exhaustive en omettant de tenir compte de toutes les situations possibles.
 - b - analyse formelle qui nécessite l'élaboration d'une spécification avec des outils à descriptifs formels. La validation consiste à prouver que le système modélisé obéit à des propriétés établies.

Les caractéristiques essentielles qui déterminent la qualité d'une spécification peuvent se définir par les critères suivant :

- la pertinence : tenir compte des besoins réels exprimés.

- la cohérence : informations non contradictoires.
- la lisibilité, clarté : faciliter la communication, la mise en œuvre et la modification sans perte d'information.
- et l'inexistence d'une forme quelconque de suggestion prématurée de solutions qui restreignent le choix des solutions possibles.

Phase de Conception.

Cette étape doit conduire à la production des automatismes programmés qui sont testés et accompagnés d'une documentation concernant leur implantation, leur exploitation et leur maintenance. Elle est ainsi dédiée à la recherche de solutions techniques répondant aux spécifications élaborées lors de la phase précédente.

L'activité du concepteur est ici consacrée à la **définition** et à la **description du fonctionnement interne** du système d'automatisme. Elle se focalise sur la réponse à la question "Comment : comment l'automatisme doit il être élaboré pour fonctionner selon les directives de la spécification ? ...".

La solution doit être :

- sans équivoque, car le dimensionnement de l'architecture matérielle et logicielle doit être retenu pour le système d'automatisme,
- complète et satisfaisante, car la solution d'automatisme doit répondre à toutes les contraintes du cahier des charges et apporter les performances opérationnelles attendues en terme de sûreté de fonctionnement et d'objectifs de coût.

Une démarche de conception nécessite aussi bien l'utilisation de "méthode" d'approche que des connaissances techniques issues du métier d'automaticien. Remarquons quelques principes de base qui rendent une méthode de conception indépendante de toute technologie, et par conséquent, garantissent l'évolutivité au système d'automatisme :

- la structuration : par raffinement (top-down), par abstraction (bottom-up), par encapsulation,
- la modularité,
- la réutilisabilité.

Phase d'implantation, d'exploitation et de maintenance.

L'implantation concerne essentiellement l'intégration du logiciel développé sur l'infrastructure matérielle. Cette opération consiste en la traduction du modèle conceptuel de la

commande élaboré lors de la phase précédente en un modèle exécutable, et à répartir la commande traduite sur un ensemble de calculateurs de pilotage.

Les adaptations, corrections et tests de mise au point ne devraient être que des tâches de finition ne réservant pas de surprises aussi préjudiciables que coûteuses en raison des efforts consacrés aux étapes de spécification et de conception. La validation et la certification du cahier des charges marquent la fin de la démarche de réalisation d'automatisme.

La maintenance qui se définit, selon [CALV90], par "*la réalisation des activités nécessaires pour garder un système opérationnel et assurer sa responsabilité après qu'il ait été accepté*", sort normalement du cadre de la réalisation d'automatisme de commande. Cependant une méthodologie de conception peut contribuer à faciliter la résolution des problèmes de maintenance. Elle peut s'effectuer par :

- l'élaboration d'une documentation claire et facilement compréhensible de l'automatisme implanté pour l'équipe de maintenance (moyen de communication),
- la considération accrue du critère de maintenabilité (c'est à dire la facilité que possède un système à supporter des changements pour satisfaire les demandes de l'utilisateur et pour corriger les défauts détectés) durant le cycle de vie.
- l'insertion d'un module de surveillance qui, pendant l'exploitation, se charge de la localisation des défauts, du diagnostic des défaillances et l'amorçage de différents types de maintenance : prédictive et préventive, corrective et curative.

I.1.5 - Le Génie "Automatique".

Nous avons déjà évoqué les nécessités d'utiliser une méthodologie dans une démarche de réalisation d'automatisme complexe. Nous rappelons quelques principes de base définissant ce qu'est une méthodologie. Elle peut se définir par l'expression d'un cheminement par étapes, qui permet d'atteindre les objectifs avec efficacité et en respectant les critères de qualité. Cette dernière signifie, selon [NF X50-20], "l'aptitude d'un produit ou d'un service à satisfaire les besoins (exprimés en potentiels) de l'utilisateur". Une méthodologie est alors un ensemble structuré et cohérent de méthodes, de modèles, de guides et d'outils permettant de déduire la manière de résoudre un problème. En effet, elle représente la boîte à outils du concepteur qui lui propose le triplet (méthodes, modèles, outils) adéquat pour chaque phase de la conception intégrée :

- Une Méthode se rapporte à des techniques de résolution caractérisées par un ensemble de règles bien définies qui conduisent à une solution correcte pour le problème.
- Le Modèle représente une interprétation significative du but recherché par l'utilisateur d'une situation ou de l'univers. Ainsi modéliser revient à élaborer une vue partielle de l'existant .
- Les Outils sont les moyens techniques (logiciels, matériels) qui mettent en œuvre des modèles selon les règles d'une méthode pour assister la conception ; exemples : outils de type CAO, de type Atelier Génie Logiciel (A.G.L), de type Atelier Intégré de Génie Automatique (A.I.G.A), etc.

Le Génie Logiciel (G.L) peut se définir comme l'application d'une démarche relevant d'une méthodologie à un domaine ciblé qui est la production de logiciels de qualité. Plus explicitement, rappelons la définition donnée par l'AFCET¹ : " ... tout développement relatif à la spécification, conception, codage, test, intégration, diffusion, exploitation, maintenance de programme. ...".

Le Génie Automatique (G.A), par contre, se démarque du G.L par le domaine d'application qui relève de l'informatique industrielle. Rappelons une définition citée au cours du Congrès AFCET 88 : "Le G.A est l'application des méthodes scientifiques au développement des théories, modèles, langages, outils favorisant la production de systèmes automatisés de qualité".

Si le G.A reprend les principes éprouvés du G.L comme "la structuration, l'abstraction, la modularité, la réutilisabilité, la généricité" puisque l'amélioration de la qualité de la conception intégrée relève en grande partie de ces concepts, il s'en différencie par la nécessité de tenir compte de la composante matérielle. De plus, la spécificité des cas d'application exige du concepteur à acquérir un savoir-faire issu du domaine concerné et du métier d'"automaticien".

Parmi les premières études résultant d'une coopération recherche - industrie, citons :

- Les cartes des activités de développement d'un SAP proposées par le CCGA² , modèle de référence des étapes de réalisation du cycle de vie d'un projet d'automatisation (fig.1.6).

¹ AFCET : Association Française des Sciences et Technologies de l'Information et des Systèmes

² CCGA : Centre Coopératif de Génie Automatique.

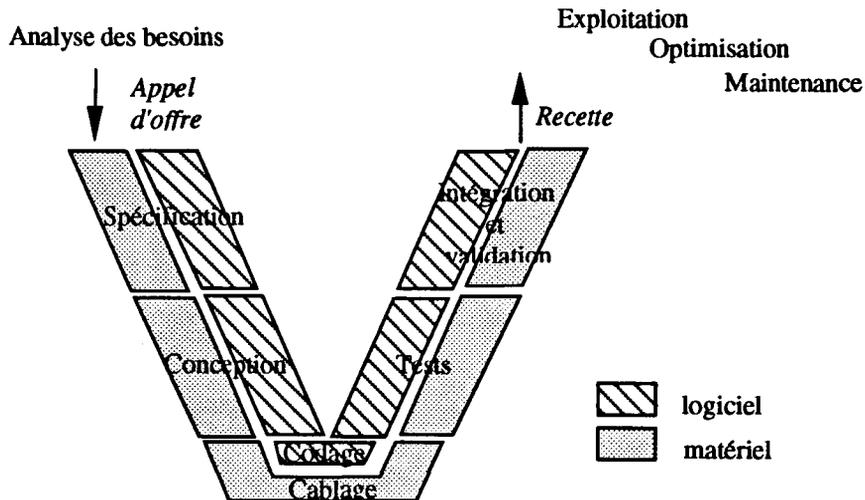


fig.1.6 - Modèle des activités de développement des SAP défini par le CCGA.

- Le GRAFCET [GRAF92], un outil de représentation de comportement déterministe d'un automate séquentiel est largement utilisé en industrie. Il est proposé également comme langage de programmation par des constructeurs d'API¹, et est devenu une norme internationale [CEI 848].

Des outils plus ou moins propriétaires, de nature CAO ou A.I.G.A (par exemple les outils K-SYS[MICH92], SPEX[PAN92]), recouvrent un certain nombre d'activités du développement du SAP. Cependant ils souffrent actuellement d'une difficulté d'intégration qui est due principalement à la spécialisation de chaque outil à une étape bien limitée, et à l'inexistence de standard d'échange de données entre les outils de la chaîne.

I.1.6 - Aspect Surveillance[JOUR92].

Tout système automatisé moderne de production doit être muni d'un module de surveillance pour le préserver de la propagation des défaillances le conduisant dans un état de fonctionnement non souhaité. Les défaillances peuvent avoir pour origine :

- des capteurs/actionneurs : défauts, encrassements conduisant à des mesures fausses des grandeurs physiques,
- de la partie opérative : pannes machines dues à l'usure, mauvais réglages, irrégularité d'entretien, mauvaise conception de la part du constructeur, etc.,
- de la partie commande et le système de communication,

¹ Automate Programmable Industriel

- de l'environnement : soit de la part de l'opérateur de conduite, par inattention, soit provenant de l'environnement (accidents, ...).

La spécificité de la fonction d'un système de surveillance conduit généralement à une conception distincte de la réalisation d'automatisme donc de la partie commande. Trois fonctions complémentaires de la surveillance sont distinguées :

- a - **la détection** : sa tâche réside dans l'observation du fonctionnement réel afin de le considérer comme étant "normal" ou "défaillant". La prise de décision vient généralement à l'issu d'une comparaison de l'état réel avec un modèle de référence de fonctionnement normal.
- b - **l'isolation** : une fois reconnue défaillante, la fonction d'isolation enchaîne sur la détection pour identifier l'origine du dysfonctionnement.
- c - **le diagnostic** : sa fonction consiste à trouver un lien entre le défaut détecté et une cause probable. La recherche de cette relation peut conduire à utiliser des techniques d'expertise.

Une solution matérielle mettant en œuvre la redondance des éléments sensibles accompagnée d'une logique de vote est souvent pratiquée bien qu'elle soit qualifiée de coûteuse. Tandis que la réalisation et la mise en œuvre des différentes fonctions de la surveillance font recours à des techniques de modélisation qui nécessitent la connaissance du procédé, souvent relatif à la nature du processus :

- modèle "continu" : estimateur, observateur, relation de redondance analytique [STAR91],
- modèle "discret" : graphe d'états, chien de garde [TOGU90].

I.1.7 - Aspect Sûreté de Fonctionnement et Évaluation de Performance.

Connaître les performances du choix matériel et du système d'automatisme développé s'impose alors pour apprécier la qualité du SAP. Des paramètres d'appréciation et des méthodes d'évaluation (quantitative et qualitative) relevant de la sûreté de fonctionnement sont nécessaires dès que les caractéristiques techniques classiques (MTBF¹ , MTTR² , taux de défaillance λ def/heure, ...) fournies par le constructeur de matériel se révèlent insuffisantes.

¹ MTBF : Mean Time By Failure

² MTTR : Mean Time To Repair

La sûreté de fonctionnement peut se définir comme l'aptitude d'un SAP à ne pas exécuter d'ordre non souhaité [BELH89]. Elle exprime dans ce sens la qualité du service rendu par le système. Elle peut être représentée comme un vecteur dont les principales composantes mesurables ou observables sont :

- la **fiabilité**.
- la **disponibilité**.
- la **maintenabilité**.
- la **sécurité**.

Remarque : D'autres activités en interaction étroite avec le SAP, et qui contribuent à la qualité de la fabrication doivent cependant être mentionnées comme :

- l'étude préalable de l'architecture du système matériel, du choix de l'instrumentation,
- l'adéquation des commandes "hautes" telles que l'élaboration du plan directeur de production, la justesse des techniques et des stratégies à long et moyen terme d'ordonnancement/lancement et de la planification de la production, et sa réactivité avec la partie commande,
- l'aspect intégration globale de tous les services de l'entreprise (approvisionnement, financement, commercial, personnel, direction, ...) afin de capitaliser les efforts entrepris dans l'automatisation des unités de production (démarche CIM³.) Ceci a pour but de proposer des produits compétitifs sur un marché de concurrence.

I.1.8 - Conclusion

Ce tour d'horizon ne prétend pas être une présentation exhaustive de l'état de l'art de l'automatisation d'unité de production. Nous avons essayé de présenter succinctement dans cette partie les différents aspects à prendre en compte dans une démarche d'automatisation des unités de production. Nous avons délibérément insisté sur la réalisation de la partie commande qui représente notre principale préoccupation dans ce mémoire.

³ CIM : Computer Integrated Manufacturing

I.2 - LES SYSTEMES DIS-CONTINUS.

I.2.1 - Présentation.

Le néologisme "dis-continu" a été attribué par le groupe de travail AFCET/SEE* comme l'appellation commune à une catégorie de systèmes qui sont à la fois continus et discrets. Un premier essai d'identification est donné dans [QUEN91] [ADPM92] afin définir les caractéristiques communes à ces systèmes. Ainsi, par définition, "les systèmes de type dis-continu associent des fonctions événementielles et des fonctions continues".

Les caractéristiques des systèmes dis-continus peuvent être identifiées dans les classes de systèmes suivants :

a - les systèmes régulés en régime semi-continu ou les systèmes continus à comportement non stationnaire.

Dans ce cas, c'est la possibilité d'une modélisation par un **modèle continu par morceau** qui traduit la caractéristique dis-continue du système. Ce modèle permet de représenter les grandes phases transitoires précédant un régime permanent. Ces phases apparaissent, par exemple :

- à la suite de la mise en marche ou en arrêt d'une unité de production : prise en compte des événements modifiant un fonctionnement permanent ,
- lors de la prise en compte d'une nouvelle consigne à la suite d'un changement d'objectif (suivi de profil).

b - les systèmes continus à événements discrets.

L'évolution de cette catégorie de systèmes dépend aussi bien des variations continues des variables d'état (ensemble d'attributs caractéristiques) que de l'apparition d'un certain nombre d'événements. Ces derniers peuvent être considérés :

- soit comme des perturbations externes :
 - * une variation de charge en échelon dans un processus de transformation continue d'énergie par exemple,
 - * la saisie ou dépose d'une pièce lors d'un asservissement de vitesse ou commande d'axes d'un robot,
- soit comme perturbations de structure ou de paramètres internes, comme dans le cas de :

* AFCET : Association Française des Sciences et Technologies de l'Information et des Systèmes
SEE : Société des Electriciens et Electroniciens

- * la saturation de l'action intégrale dans les régulateurs de structure Proportionnelle et Intégrale provoquant un effet Proportionnel.

c - les systèmes à structure changeante.

Ce sont des systèmes de nature continue qui subissent des modifications de structure interne à la suite d'une réception d'événements provenant, par exemple, d'un milieu fonctionnel hiérarchiquement supérieur comme :

- la commande Tout ou Rien appliquée à un système continu,
- les commutations dans les systèmes redondants,
- les changements de mode de marche.

Ces caractérisations du "dis-continu" reposent essentiellement sur la particularité continue et événementielle de la dynamique comportementale du système. En fait, cette définition de la "dis-continuité" met l'accent sur l'évolution du système qui est conditionnée à la fois par :

- les **variations continues des composantes du vecteur d'état** qui représentent, à tout instant, les paramètres caractéristiques du système. Cette évolution peut être représentée au moyen des trajectoires d'état contenues dans un espace d'état d'un repère approprié. Son élaboration et l'étude de ses propriétés font appel à des techniques d'approche de l'**Automatique Continue** (Analyse et Synthèse, Modélisation, Identification et Simulation de système).
- l'**enchaînement d'apparition d'événements** provoquant des modifications, de façon instantanée, soit des valeurs des composantes du vecteur d'état, soit de la nature des composantes induisant un changement de modèle continu pour le système.

d - Une mixité des techniques de l'Automatique mises en œuvre.

Une seconde particularité des systèmes dis-continus peut être déduite de cette première analyse. Elle est perçue sur le plan des techniques d'analyse et de modélisation utilisées pour étudier et concevoir la partie de commande. La nécessité d'associer conjointement deux techniques issues de deux branches de l'Automatique, jusqu'à présent disjointes, lors de la conception de la commande marque la particularité du "dis-continu". Dans cette seconde interprétation, c'est la mixité de la technique mise en œuvre, **Automatique Continue** et **Automatique des Systèmes à Événements Discrets**, qui détermine la nature dis-continue du système.

Le couplage des deux techniques est vraisemblablement de degrés variables selon le cas étudié et suivant les finalités visées par l'étude. Cependant, il faut souligner que la possibilité d'une éventuelle abstraction d'un des deux facteurs d'évolution du système mixte, telle que la hiérarchisation, peut transformer un système "dis-continu" en deux sous-systèmes continu et à événements discrets structurellement séparés. Le cloisonnement, par le biais de telles structurations, peut conduire à la spécialisation de chaque technique de l'automatique à chaque sous-système. Ainsi la problématique du "dis-continu" est transformée par ce mécanisme en une juxtaposition de la problématique du continu et du discret. Une application successive mais disjointe des deux techniques reste alors la solution pratiquée. Même si les caractéristiques répondent aux définitions données précédemment, ces systèmes sont considérés comme pseudo - "dis-continus", et par conséquent, ne présentent pas d'intérêt majeur dans le cadre de cette étude.

I.2.2 - Interprétation et sémantiques du Continu et Discret.

La perception de la nature attribuée à un système quelconque se prête généralement à des interprétations subjectives fortement marquées par les objectifs de la démarche à engager. Qualifier de "continu", "discontinu", "discret", ou "événementiel" un système fait implicitement référence à des modèles de représentation identifiés ou à des définitions formelles bien établies. A ce stade de notre rapport et afin d'être complet dans cette étude, il importe de préciser les notions et concepts attachés aux sous-systèmes de base composant un système dis-continu.

I.2.2.1 - Les Systèmes Continus.

a - Temps continu.

D'un point de vue mathématique, définir la continuité d'un système évolutif S , appelé "processus", repose sur la nature de l'échelle de temps sur laquelle se réfèrent les variables d'états (x_i) ($i \in N$ ensemble des nombres entiers) déterminant le vecteur d'état du processus. Ainsi, un processus est communément appelé continu si :

- le temps t d'observation des variables d'état x_i évolue dans \mathbf{R} (ensemble des nombres réels), c'est à dire : $t \in \mathbf{R}$.

Chaque variable d'état x_i se définit alors comme une fonction réelle, continue et dérivable par rapport au temps.

En regroupant ces variables d'état x_i , formant un ensemble fini de variables, dans un vecteur X de \mathbf{R}^n , ($n \in \mathbf{N}$ et X le vecteur d'état), l'évolution de X sur un horizon de temps T de \mathbf{R} représente un espace E des états admissibles pour X .

Par définition [BORN91], si E est un ensemble compact, le système S est dit **système à états continus**.

b - Temps discrets : les systèmes échantillonnés ou systèmes continus à temps discrets.

La distinction est faite sur l'observation ou la commande des variables d'état x_i qui ne s'effectue qu'à des instants bien précis dans le temps, par exemple, aux instants d'échantillonnage périodique cadencés par une horloge.

- le temps d'observation t de X est une variable à valeurs dans \mathbf{N} , c'est à dire $t \in \mathbf{N}$.
Chaque variable x_i du système se définit alors comme une suite réelle et récurrente par rapport aux itérations de temps d'observation.

Plus formellement, S est appelé un **système à états temporels discretisés** si E est **dénombrable** (donc non compact).

Si les définitions du temps continu et du temps discret évoquées précédemment s'inspirent de formulation mathématique, des caractérisations similaires sont présentes dans l'étude de classification morphologique (fig.1.7) effectuée en "Théorie et Traitement du signal et de l'information".

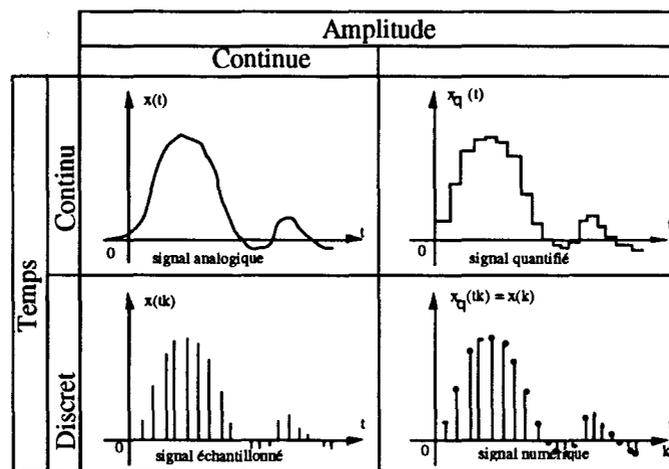


fig.1.7

I.2.2.2 - Les Systèmes Discontinus.

Les systèmes discontinus sont synonymes de systèmes logiques et séquentiels dans de nombreux ouvrages (par exemple dans [VALE86]). Nous attribuons cette appellation à des processus définis par une dynamique qui est conditionnée par deux facteurs :

a - l'évolution continue par rapport au temps des variables caractéristiques du processus.

Le temps est de nature continue, et prend donc ses valeurs dans \mathbf{R} .

b - l'apparition d'événements significatifs, qui provoque un **changement de valeurs** de ses variables caractéristiques en un temps nul ou considéré comme infiniment court. La structure interne du processus reste toujours inchangée pendant l'horizon d'évolution (fig.1.8).

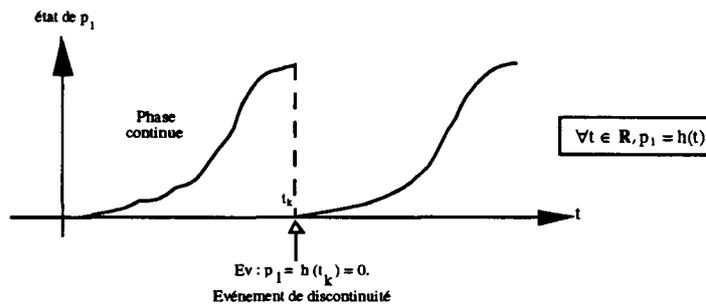


fig.1.8 - Exemple d'une évolution discontinue d'un système monovariante p_1 .

I.2.2.3 - Les Systèmes Événementiels ou à Événements Discrets.

Dans le pilotage d'objet considéré individuellement "intelligent" dans sa détermination locale (pièce palettisée sur un convoyeur par exemple), l'évolution au sein d'un ensemble fini d'objets afin d'atteindre un état final (pièce usinée) résulte de la prise d'une série de décisions à la suite d'occurrence d'événements (ordre de lancement, demande d'accès à un tronçon, signal ou message d'autorisation d'accès, ...).

Les particularités de l'évolution des systèmes événementiels, typiques aux systèmes artificiels (man-made systems), reposent essentiellement sur les notions suivantes :

a - **Événements discrets.**

Plus pertinente pour modéliser la dynamique de ces systèmes, la notion d'événement remet en cause l'unicité de la référence absolue du temps. En effet, un temps logique marqué par les occurrences d'événements traduit le temps continu physique en une métrique multiforme du temps :

exemple : temps = centimètre dans "faire (action) tous les 4 cm"

temps = litre dans "faire (action) dès que capacité == 2l"
 temps = degré Celsius dans "faire (action) jusqu'à température == T°C".

Le temps continu ($t \in \mathbf{R}$.) peut être utilisé localement par une activité à contraintes de temps de réponse, dans ce cas, il est plutôt associé à une notion de durée (délai) que de référence absolu d'évolution.

Selon [DUB85], un événement correspond à une variation de l'état d'un objet. Un événement se définit donc comme un changement d'état qui initialise une activité qui n'était pas en cours auparavant. Les causes qui provoquent l'apparition d'événements peuvent être :

- soit d'origine interne au système : dans ce cas, on parle alors d'une évolution autonome. Ces événements peuvent se présenter sous différentes formes :

* Signaux d'exception. Issus d'un module de surveillance, ces signaux sont émis en cas de dysfonctionnement constaté :

Exemple : "dépassement d'un temps opératoire T, émettre alarme = urgence 3".

* Passage à vrai ou à faux des expressions logiques de pré-conditions d'une règle.

Exemple : une activation d'une opération à la suite d'une détection de seuil :

Si (*température* > T_{seuil})

alors (*activation d'une opération de refroidissement*).

* Signaux de synchronisation et de partage de ressource. Par exemple,

- mis à 1 ou 0 d'un drapeau (flag).

- signaux associés à un rendez-vous, sémaphore, ...

- soit externe au système : l'évolution est alors qualifiée de non autonome. Les événements sont principalement issus des interactions avec l'environnement. Ils nécessitent une prise d'information réalisée, par exemple, à l'aide des capteurs, des boîtes aux lettres, des interfaces de dialogue homme/machine :

* présence de pièce,

* arrivée d'un accusé de réception.

b - Réceptivité.

La notion de réceptivité caractérise la sensibilité de la dynamique d'un système événementiel aux occurrences d'événements. L'apparition d'un événement significatif dans un état donné provoque un changement d'état ou d'activité. L'évolution des

systèmes événementiels est alors "cadencée" par les occurrences d'événements (event driven).

c - États discrets.

Lié à la notion d'événement, un état est délimité par deux occurrences successives d'événements. Pour modéliser la dynamique de ces systèmes, on est amené à définir dans quelles activités (états) vont s'engager les objets concernés par un événement. On constate ici la dualité entre événement et activité : toute activité est marquée à son début et à sa fin (ce dernier correspond au début d'une autre activité) par un événement. Ainsi la considération atomique de ce qui se passe entre deux occurrences (une activité vue comme une boîte noire) définit les états discrets des systèmes événementiels.

La notion de processus (système évolutif) est perçue alors comme une succession d'un nombre fini d'états d'un objet ponctués par une séquence d'événements. Une relation de précedence rend spécifique l'évolution de chaque objet du système d'ensemble.

Remarque sur la nature des systèmes.

Nous tenons à remarquer qu'un même système peut être modélisé avec des changements d'états continus ou avec des changements d'états événements discrets. C'est le modèle utilisé qui est alors de nature continue ou événementielle et non pas le système en lui-même. Par exemple, dans le cas d'usinage d'une pièce sur une machine outil, on peut aussi bien s'intéresser à la transformation continue de la surface usinée de la pièce que de ne s'occuper que des dates de début et fin de l'opération. Le modèle utilisé conditionne, par conséquent, la nature du système (continu ou événementiel). Nous présentons en annexe les principaux modèles exploités en "Automatique Continue" et en "Automatique Événementielle".

I.2.2.4 - Résumé

Nous nous sommes basés sur la notion de temps pour caractériser la dynamique des systèmes continus et des systèmes événementiels. L'interprétation du temps représente, de notre point de vue, un moyen de distinction entre ces deux systèmes.

Si une différence fondamentale existe entre "temps continu" et "temps événementiel", des modèles et outils de représentation de systèmes évolutifs sont aussi caractéristiques des techniques de l'Automatique Continue comme ceux qui sont spécifiques à la description des systèmes à événements discrets.

I.3 - AXES PRINCIPAUX D'ÉTUDE.

I.3.1 - Problématiques des systèmes dis-continus.

A partir des modèles classiques de l'Automatique Continue et Événementielle que nous avons rappelés en annexe, deux faits marquent les difficultés rencontrées lors de l'étude des systèmes dis-continus, et en particulier lors d'une démarche d'automatisation.

D'une part, au sein de chaque branche de l'Automatique, les modèles et les méthodes sont dédiés à des situations bien définies. La vérification des hypothèses et des conditions très strictes, gages d'obtention de résultats non erronés, restreignent leur domaine d'application. Par conséquent, leurs propriétés de validation disparaissent généralement dans un contexte dis-continu.

La **spécialisation** des deux branches de l'Automatique limite ainsi leur utilisation dans l'étude d'un système dis-continu par nature ou dans une démarche se voulant, par essence, être synchrétique.

La divergence de développement des techniques de l'Automatique continue et de l'Automatique événementielle est donc une source de difficultés quant à leur réutilisation commune appliquée aux systèmes dis-continus.

D'autre part, les outils de mise en œuvre qui appliquent les modèles et les méthodes sont relativement fermés. Diverses raisons expliquent cela :

- la préservation du savoir-faire issu de nombreuses années d'expérience dans un domaine d'application,
- la politique de rentabilité et commerciale des constructeurs de logiciels et de matériels d'automatisme qui privilégient la gamme "propriétaire". Exemples : l'atelier XTEL [DUF92] dans le monde matériel Télémécanique; ORPHEE [FORM91] pour le matériel April.

L'intégration des outils de développement des automatismes n'est pas encore une réalité bien que de récentes prises de conscience de la part de constructeurs ou de groupe de recherche aient donné lieu à des études de faisabilité sur l'ouverture des outils d'automatisme. Citons à titre d'exemples :

- plate-forme de développement indépendant des machines cibles. Exemple : BaseStar [CLOU92] de la société Digital.
- des outils à structure d'accueil pour les outils d'autres activités, ou munis de passerelles de communication avec ceux de fonctions avoisinantes.

- définition de structure d'intégration par les données générées par divers logiciels couvrant le cycle de vie d'un système automatisé : Base_PTA [CCGA].

I.3.2 - Orientation de l'étude sur les systèmes DIS-CONTINUS.

La dis-continuité d'un système prend naissance dans toute association des caractéristiques des systèmes à événements discrets et à états continus. Cette particularité nécessite par conséquent la mise en œuvre conjointe des techniques de l'Automatique Continue et Événementielle pour réaliser une démarche d'étude rationnelle. Une telle approche devient incontournable pour le développement des automatismes dans de nombreux domaines tels que l'aéronautique ou les processus industriels de production.

En s'intéressant à l'automatisation des systèmes de production, l'étude des systèmes dis-continus nous a amené à distinguer :

- les **systèmes de production dis-continus par nature**,
- et l'utilisation de **modèles continu et discret pour un système homogène**.

I.3.2.1 - Systèmes de production dis-continus par nature.

Dans ce cas, on assiste à un mélange à proportion non négligeable des caractéristiques spécifiques aux SECs et SEDs où une démarche par simple hiérarchisation n'est pas appropriée. Les facteurs principaux que nous retenons afin de caractériser un système dis-continu par nature sont :

a - Temps hybrides : temps continu et les événements.

Le temps se présente à la fois comme temps continu, et comme occurrences d'événements significatifs. L'état global et instantané est déterminé par une historique d'événements et par l'évolution continue entre deux occurrences.

b - Variables, paramètres, signaux continus et logiques.

Le traitement, au sein d'un même contrôleur (une boucle de commande par exemple), opère sur :

- des grandeurs physiques analogiques telles que le débit, la pression, la température , etc.,
- des variables associées à des prédicats : variables tout ou rien, variables associées à des partages de ressources (sémaphores, drapeaux) , variables associées à des fonctions de décision et de choix, associées à des expressions logiques, associées à des conditions

de détection où tout franchissement est synonyme d'apparition d'événements modifiant le comportement en cours (alarmes, chiens de garde, etc.).

c - Fonctions continues et logiques.

La mixité des ces fonctions est caractérisée par l'association dans une même unité de commande des fonctions de type continu (essentiellement des fonctions de **régulation** et d'**asservissement** des grandeurs continues) et des fonctions de nature événementielle telles que :

- **fonctions logiques** de sécurité et de protection.
- **fonctions de conduite à comportement séquentiel** (gestion de gammes opératoires, gestion des modes de marche/arrêt).
- **fonctions de gestion de mode de fonctionnement** (automatique, manuelle).

D'autres facteurs seront pris en compte et feront l'objet d'un développement à part dans le second chapitre de notre mémoire pour caractériser les systèmes de production dis-continus (systèmes de production à états continus-discrets). Ils se rapportent aux notions de :

- **produit** et son **processus de transformation**.
- **dynamique de la partie opérative** pendant le cycle de fabrication.
- **dynamique couplée du "produit - partie opérative"**.

I.3.2.2 - Utilisation de modèles continu et discret pour un système homogène.

Il pourrait s'agir tout aussi bien d'un système homogène par nature (soit continu ou événementiel) mais la particularité de la démarche requiert l'utilisation d'une approche mixte relevant à la fois du type SEC et SED.

Cette approche continue - événementielle peut s'effectuer sur les principales phases de la conception intégrée :

- en phase de spécification ,
- en phase de conception, modélisation,
- en phase de simulation.

Dans la phase de spécification des besoins en équipement (matériels et logiciels) qui est nécessaire à l'établissement d'un cahier des charges complet, la démarche d'investigation et de collecte de données est proche de celle utilisée en analyse de la valeur. De ce fait, elle ne fait pas de distinction dans un premier temps, entre système continu et manufacturier [EXER90].

Ce sont sur les phases suivantes que portent les derniers développements de la recherche sur les systèmes dis-continus. Pour les phases de simulation et modélisation, nous présentons succinctement ici à titre d'exemple :

- l'outil CP2M : "Conception de Processus de Production Mixte" [LARI92],
- et le modèle mixte Réseau de Petri (RdP) hybride [BAIL91].

CP2M est un outil de simulation qui associe deux modèles :

- * l'îlot discret décrivant le comportement de la partie discrète par réseaux à files d'attente,
- * l'îlot continu dans lequel les comportements continus sont décrits sous forme d'équations algébriques et ou différentielles implicites.

Un îlot mixte (continu et discret) est obtenu en associant les deux d'îlots par l'intermédiaire de deux types d'interface :

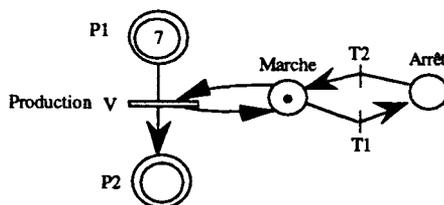
- l'îlot continueur : provocateur d'évolution temporelle de variable continue à partir d'une entrée événement,
- l'îlot discrétisateur, un générateur d'événements (création de client) basée sur une détection de seuil par une variable continue.

Le Réseau de Petri hybride résulte d'une association de RdP à marquage discret et de RdP Continu [DAV91]. Le graphe est alors formé d'éléments graphiques issus de chaque modèle de base :

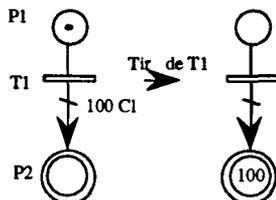


L'évolution d'un modèle hybride est régie par les règles de franchissement des C_transitions et des D_transitions (voir annexe). L'activité du graphe est analysée à partir d'un état biparti composé de marquage discret M_d et d'un état de marquage continu M_c , et du vecteur vitesse V_c . Le modèle hybride obtenu permet de représenter des interactions entre dynamique des paramètres continus du type (M_c et V_c) et des paramètres discrets (M_d). Les actions de la partie discrète sur le comportement de la partie supposée continue sont principalement :

- modification instantanée de valeurs pour le vecteur vitesse,

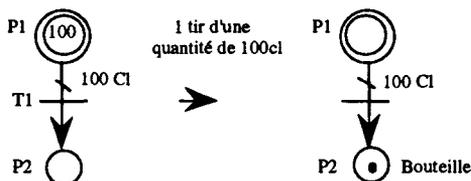


- transformation des entités discrètes, jetons, en quantités réelles de marque.

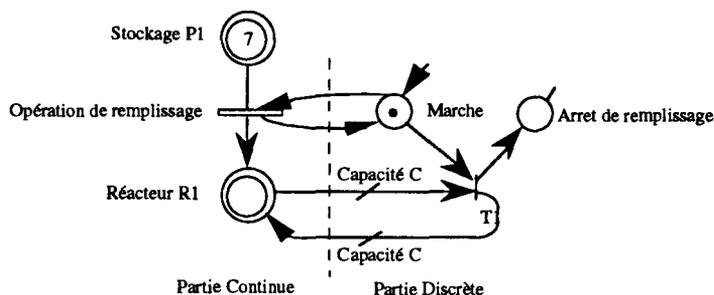


Les actions inverses mettent en évidence des opérations du type :

- transformation d'une quantité réelle (marquage des C_places) en quantité dénombrable de jetons (marquage des D_places),



- génération d'événements (ici arrêt de remplissage) suite à un dépassement des conditions aux limites par des grandeurs continues (niveau réacteur == Capacité C).



Il est à remarquer que les RdP sont, par essence, des outils de modélisation des SEDs. Les extensions qui tiennent compte des grandeurs analogiques (vecteur vitesse pour les RdP Continus) ont été possibles par un mécanisme d'approximation. Dans le cas des RdP continus, cette approximation limite leur utilisation aux réseaux à activité stationnaire et à places marqués par un grand nombre de jetons. Le modèle obtenu permet alors d'analyser les tendances

d'évolutions de marquage vers des régimes de fonctionnement permanent (soit fonctionnement bloqué, linéaire, ou saturé).

Nous résumons les principales orientations des études sur les systèmes dis-continus dans la figure (fig. 1.9).

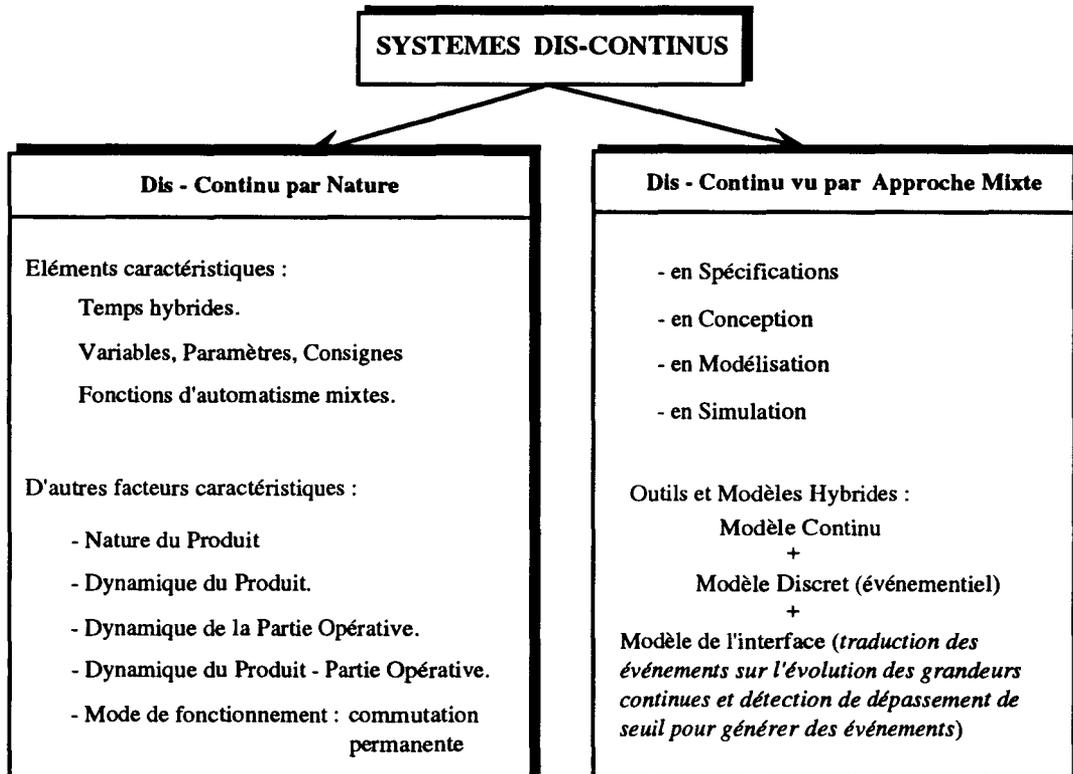


fig.1.9 - Principaux axes d'études sur les systèmes dis-continus.

I.4 - ASPECTS DIS-CONTINUS DE LA PARTIE COMMANDE

La partie commande d'une unité de transformation présente un champ d'interaction des fonctions d'automatisme dis-continu. Nous rappelons ici les principales fonctions observées à ce niveau et essayons de définir les types d'interaction échangés.

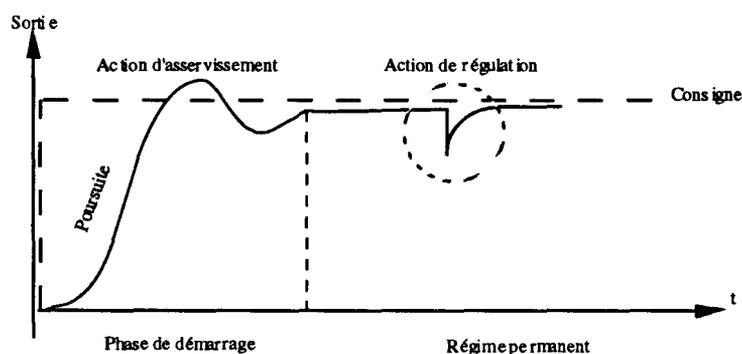
I.4.1 - Fonctions d'automatisme continu.

Les activités dominantes dans la conception de système de commande continue concernent essentiellement l'élaboration des fonctions de suivi de profil et de maintien des conditions normales de production. Les fonctions de suivi sont observées notamment pendant les phases transitoires de démarrage et d'arrêt de l'unité. Quant au second type de fonctions, elles opèrent sur une longue période de régime permanent sans changement significatif des consignes.

I.4.1.1 - Asservissement et Régulation.

La distinction entre fonction d'asservissement et de régulation repose sur les objectifs que doit satisfaire la loi de commande à élaborer. La fonction de régulation est chargée d'annuler asymptotiquement les conséquences des perturbations sur l'état du processus. En fait, la consigne à respecter est ici constante et, le rôle du régulateur est de maintenir le comportement du processus le plus proche possible de la consigne.

La fonction d'asservissement est mise en œuvre pour poursuivre une trajectoire de consigne. Cette dernière est alors fonction du temps.



Différences entre régulation et asservissement [LAND84]

I.4.1.2 - Principes de commande des processus continu.

Nous proposons de présenter et d'illustrer par des exemples concrets les concepts généraux de la régulation sans développer leurs théories mathématiques.

Une régulation appliquée sur un procédé [BHAL90] peut être définie comme étant une commande C :

- transmettant un ordre (appelé consigne) qu'elle reçoit,
- vérifiant que cet ordre a été exécuté dans des conditions désirées,
- opérant de façon continue dans le temps,
- et indépendante des perturbations subies par le procédé.

Les liaisons physiques avec le procédé sont réalisées à l'aide des transmetteurs chargés de communiquer l'état des grandeurs réglées, et à l'aide des organes d'exécution qui permettent d'agir sur les grandeurs réglantes (fig. 1.10).

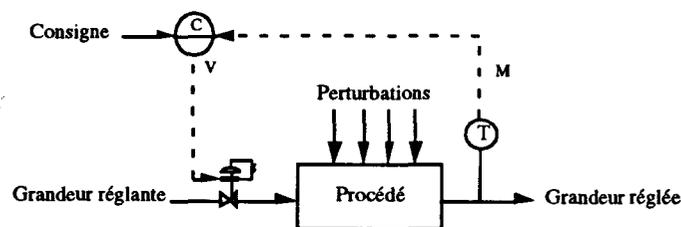


fig.1.10a - Procédé et Boucle de commande associée.

Commande en boucle ouverte.

Ce type de régulation consiste à fixer la commande une fois pour toutes en fonction de la consigne. La génération de l'action de réglage ne tient pas compte alors des variations de la grandeur réglée, donc par conséquent de l'effet des perturbations. Ce fait présente l'inconvénient majeur reproché à cette structure de commande.

Commande en boucle fermée.

La notion de commande en boucle fermée (principe de la rétroaction) renferme le concept de base de l'Automatique continue. Schématiquement, le rôle de la commande est de réagir instantanément à toutes dérives constatées sur les grandeurs réglées. Cependant, la commande agit après constatation de l'effet des perturbations sur les grandeurs réglées (action à posteriori). Ceci peut être pénalisant pour piloter des actionneurs sensibles. Le système asservi peut être représenté sous la forme suivante (fig.1.10b) :

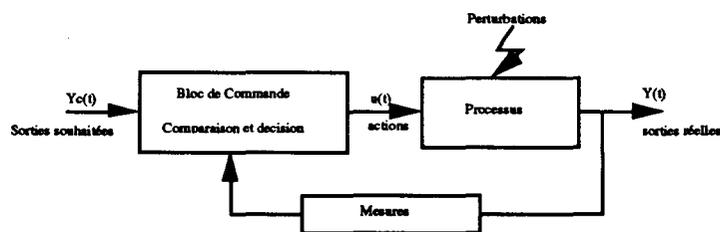


fig. 1.10b.

Diverses stratégies de commande peuvent être alors mises en œuvre pour palier aux limitations d'une simple boucle de commande monovariante (par exemple de limitations : grandeurs réglées non mesurables, processus multivariante, anticipation sur l'effet des perturbations ,...) et pour répondre à des besoins de performance.

- a - Commande par **régulation en cascade**. Cette structure est obtenue en associant une première régulation, appelée boucle externe, qui va ajuster le point de consigne d'une seconde, appelée boucle interne. Son utilisation souvent sur les procédés lents (à grande inertie) améliore la précision en diminuant l'effet des perturbations sur la grandeur réglante ou intermédiaire.
- b - Commande par **régulation de rapport**. La pratique de ce type de régulation se justifie pour répondre à un besoin de maintenir un ratio constant entre deux grandeurs. Une grandeur est alors asservie en fonction de l'évolution d'une deuxième en maintenant le rapport. Une application classique en est le maintien du rapport air/combustible constant pour une meilleure combustion.
- c - Commande par **régulation à priori**. La conjugaison de deux actions dont une est issue d'une commande en boucle fermée (asservissement de la grandeur réglée par celle réglante) et l'autre est d'une commande en boucle ouverte (action sur la grandeur réglante en connaissance de l'effet des perturbations) est utilisée par ce type de commande. La prise en compte anticipée des perturbations présente l'avantage de s'affranchir de leur effet au moment où elles se produisent, par contre sa mise en œuvre requiert une bonne connaissance des perturbations.
- d - Commande par **régulation à modèle interne**. L'insertion d'un modèle mathématique du procédé dans la boucle de régulation, utilisée par cette stratégie de commande permet de fixer la trajectoire des grandeurs réglées pour tout changement de consigne. La comparaison entre la sortie réelle du procédé et la sortie du modèle mathématique permet d'ajuster la correction de l'action de réglage.

I.4.1.3 - Critères de performances des fonctions de régulation.

Les principaux critères requis pour évaluer les performances des commandes de nature continue reposent essentiellement sur la notion de :

- **stabilité** : elle définit la propriété d'un processus à être ramené suite à un effet de perturbation vers un état stable.
- **précision** : cette notion quantifie l'écart toléré en fonctionnement normal (régime permanent) entre les trajectoires de référence des grandeurs à analyser et leur évolution réelle.

Remarque : concevoir une commande satisfaisant à la fois le critère de stabilité et de précision conduit à remplir des conditions contradictoires. Le dilemme stabilité-précision, rencontré tout au long de l'étude des systèmes asservis, impose à faire un compromis dans la mise au point de la commande.

- **robustesse** : ce critère de qualité des commandes continues peut se définir par la capacité d'un système de commande à préserver le processus dans un domaine de fonctionnement jugé acceptable lorsque le processus se trouve dans des conditions réelles de fonctionnement donc non idéales. Ces conditions réelles peuvent comporter par exemple des bruits non connus, des erreurs dues à la simplification de modèle, erreurs de mesure dues à des capteurs défaillants, mauvaise approximation faite par l'algorithme de commande, etc.
- **critères dynamiques** : les exigences de performance peuvent comporter des caractéristiques relatives au comportement en phase transitoire telles que :
 - la rapidité ou temps de réponse mis par la grandeur réglée à atteindre sa valeur définitive (être dans la marge de consigne $\pm 5\%$ par exemple).
 - le retard qui est le temps mis par le processus pour commencer à réagir à l'action sur les grandeurs réglantes.

I.4.2 - Fonctions d'automatisme logique.

Ces fonctions sont observées au niveau coordination et supervision de la partie commande. Elles contribuent à la traduction de l'ordre de lancement en fabrication issu de l'ordonnancement en commandes fines exécutables par les fonctions de régulation. En plus des fonctions complémentaires telles que la gestion de communication, l'interface homme/machine,

la gestion de bases de données temps réel, nous regroupons suivant leurs objectifs les fonctions qui nous paraissent les plus pertinentes de cette chaîne de traitements.

Fonctions de Gestion de modes de marche et arrêt.

L'objectif visé par cette classe de fonctions est la commande effective d'unités de traitement en tenant compte des modifications de leurs états. Les états retenus par ce niveau de commande concernent des états discrets tels que : état à l'arrêt, état de marche normale, état de marche dégradé, état de démarrage.

L'évolution entre ces états est modélisée alors par des transitions qui sont franchies à la suite d'occurrence d'événements déterminés. Des outils caractéristiques de l'automatisme discret sont plus adéquats pour modéliser le comportement des unités :

- le graphe d'états déduit du modèle de référence du GEMMA [ADEP79],
- le Grafcet.

Fonctions de gestion de modes de fonctionnement.

Ces fonctions sont particulièrement importantes et complexes dans le cas des unités de fabrication ne traitant pas la matière de manière continue. En effet, pour les procédés dits "continus" où les unités sont alimentées et soutirées avec le même débit, cette activité se réduit à la configuration et l'activation, une fois pour toute au démarrage, des fonctions de régulation des paramètres caractéristiques du processus.

Par contre, le rôle de ces fonctions devient primordial pour une fabrication dont l'ordre d'exécution des étapes de fabrication et des opérations élémentaires associées déterminent le traitement spécifique à chaque produit. Ce type de fabrication est constaté surtout sur les unités qui fonctionnent en mode :

- "**Fedbatch**" où l'opération de transformation du produit a lieu en même temps que l'on alimente en ingrédients et en additifs l'unité de traitement (parallélisme entre opération de transformation et de chargement),
- et en mode "**Batch**" où une opération de transformation est unitaire (fig.1.11).

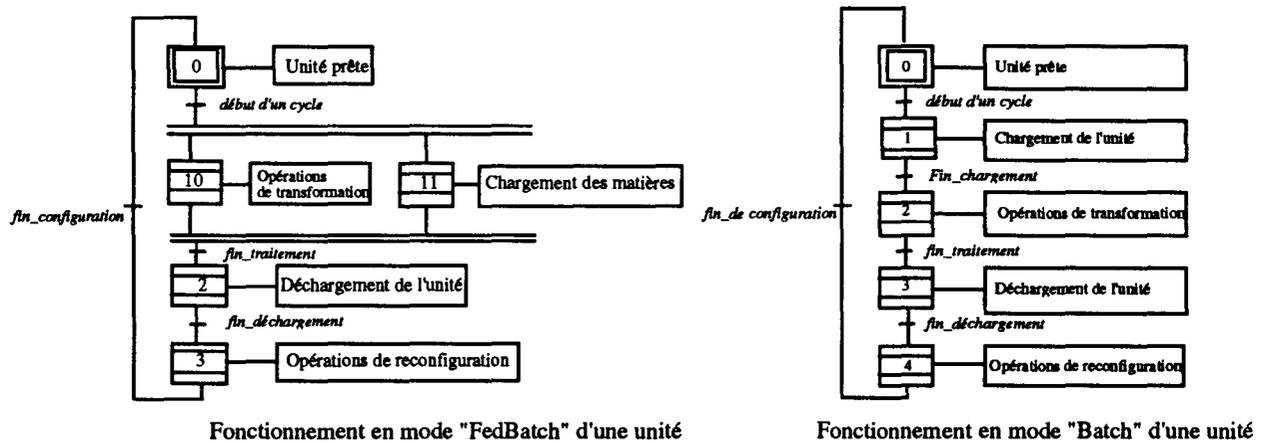


fig.1.11.

Fonctions logiques et combinatoires de surveillance et de sécurité.

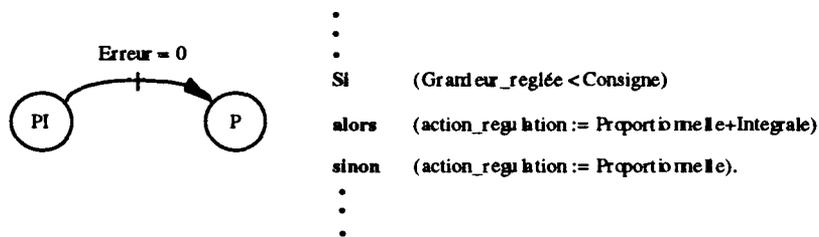
- Gestion des alarmes. L'occurrence d'un signal d'alarme signifie l'apparition d'une anomalie de fonctionnement. Selon leur sévérité et leur urgence, cette fonction procède le plus souvent à des opérations de traitement des règles d'acquiescement, d'échanges d'informations avec l'interface opérateur (synoptique), etc.
- fonctions d'interverrouillage de sécurité. Sa mission de base est de détecter les dysfonctionnements des organes matériels, les conditions dangereuses d'exécution d'une commande et de ramener l'état du procédé dans un état de repli. Bien qu'en général, les réactions réflexes de survie soient intégrées sur chaque matériel par les constructeurs (exemple de la machine à laver s'arrêtant automatiquement dès que la porte s'ouvre), la préservation du bon fonctionnement global d'une unité mettant en œuvre conjointement un certain nombre d'équipements relève d'un ensemble d'opérations d'investigation et d'analyse combinatoire sur un modèle de représentation : modèle entités/reliances (exemple : arbre de défaillances), modèles de connaissance à base de règles.

Fonctions à commandes logiques et séquentielles.

Nous regroupons dans cette classe les fonctions qui sont chargées de commander, par exemple,

- le positionnement des actionneurs Tout ou Rien : marche/arrêt, ouverture/fermeture,
- la temporisation des opérations et des étapes,
- la commutation par changement de valeurs et par changement de structure d'une fonction de commande en cours :

exemple : Régulation par reset windup,



- les procédures de prise de décision par un système de règles afin d'adapter les valeurs des consignes, des constantes, et la structure de la commande à imposer aux fonctions de régulation en fonction de l'état du processus.
- et les fonctions de gestion de séquences d'opérations de transformation (par exemple la gestion de gammes fabrication, de recettes de préparation).

I.4.3 - Différents types d'interaction entre automatismes continu et discret

Les échanges entre ces deux types d'automatisme méritent une considération particulière lorsqu'elles sont quasi-permanentes au cours d'un processus de fabrication. Situation typique d'une production en mode de fonctionnement fedbatch et batch, la maîtrise de ces interactions devient une condition vitale pour le système de commande. En effet, la discontinuité de la nature d'opérations à effectuer pendant un cycle de fabrication, le paramétrage souvent en temps réel des consignes de régulation afin de répondre au spécificité de chaque opération et de chaque produit illustrent l'importance des interactions entre ces commandes.

Elles comportent essentiellement des opérations d'initialisation au démarrage, des ordres d'activation et de désactivation des blocs de fonctions de régulation à des moments bien déterminés. Au cours du processus, elles peuvent correspondre à des ordres d'ajustement de paramètres de fonctionnement ou de changement de structure des fonctions de régulation.

Les actions des automatismes continus sur les automatismes discrets consistent surtout en la génération d'événements provoquée par une violation des conditions aux limites des grandeurs continues du processus. Le changement d'état (sévérité et urgence) d'une alarme représente les conditions de réceptivité faisant évoluer les automatismes discrets.

Les échanges entre ces deux natures d'automatisme peuvent être résumées par le schéma suivant :

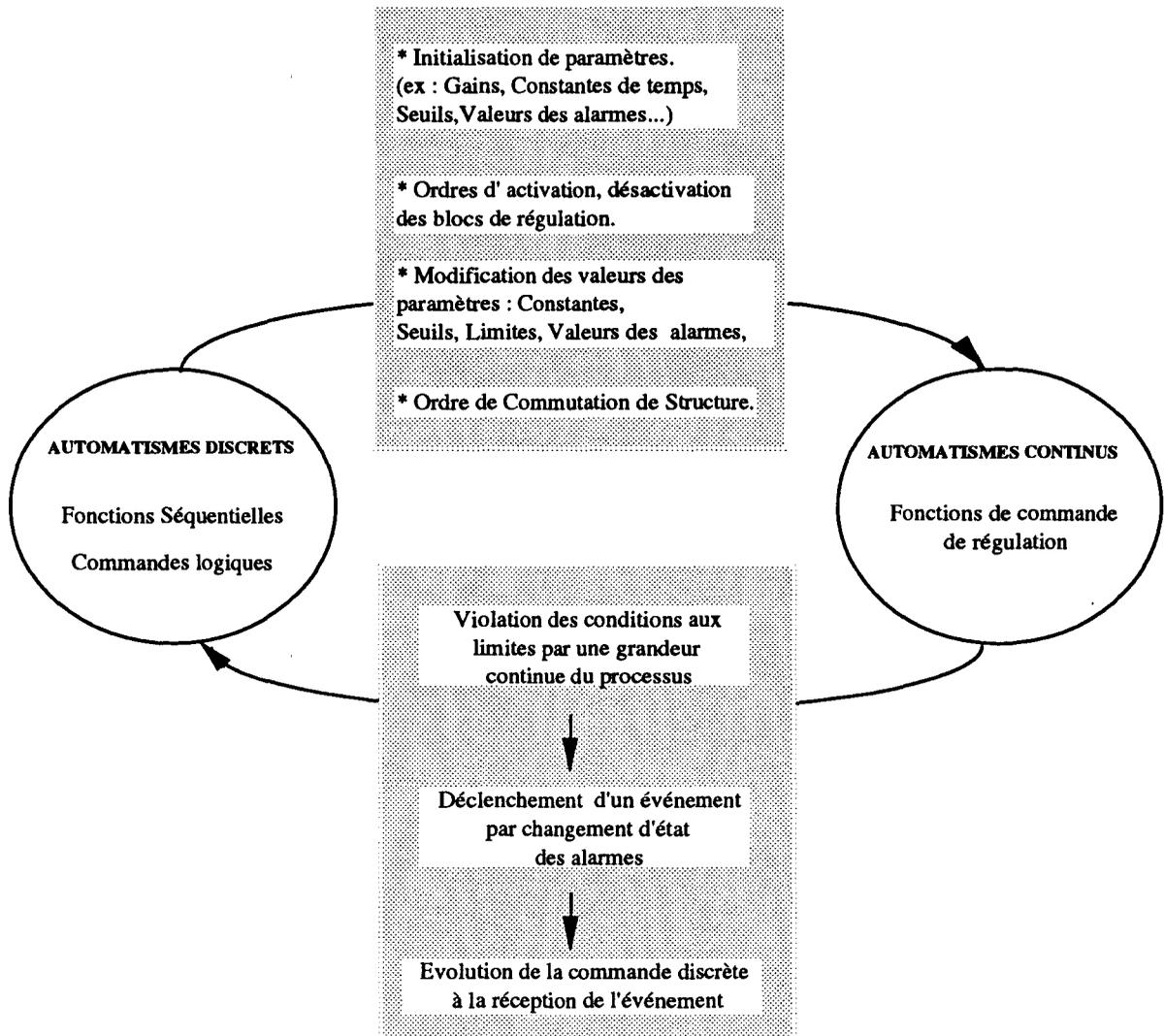


fig.1.12 - Types d'interactions observées entre automatisme continu et discret.

I.5 - CONCLUSION.

Dans cette partie, nous avons délimité le cadre d'étude de ce mémoire : les **systèmes de production et leur partie commande**. Nous sommes restés également dans ce cadre pour définir les **systèmes dis-continus**. Ceci nous a permis de formuler la dis-continuité d'un système qui se définit par **l'association des caractéristiques des systèmes à états continus et à événements discrets**. Cette caractéristique dis-continue est inhérente aux systèmes de production à états continus-discrets par nature. Elle peut être également identifiée dans une démarche de réalisation d'automatisme mettant en œuvre simultanément les techniques de l'Automatique des systèmes à états continus et à événements discrets.

La caractérisation d'un système de continu ou d'événementiel n'est en fait qu'une question de point de vue et, nullement un critère de séparation entre les branches de l'Automatique. Ces points de vue doivent naturellement cohabiter lors de l'étude des Systèmes à **États Continus Discrets (SECDs)**. La recherche de gain de productivité a naturellement induit une tendance d'évolution vers la flexibilité de production. Cette flexibilité commence à apparaître dans les processus de fabrication continus. Elle engendre la nécessité d'une approche conjointe de type SED et SEC.

L'étude des systèmes dis-continus nous a amené à distinguer deux axes d'orientation :

- l'étude des systèmes qui, par nature, présentent une dynamique mixte à la fois caractéristique des processus continus et événementiels,
- et la modélisation mixte, combinaison d'un modèle continu et événementiel, pour représenter un système de nature quelconque.

Au niveau de la partie commande d'une unité de fabrication, nous avons dégagé les objectifs différents mais complémentaires des deux types d'automatisme mis en jeu pour rendre effectif au niveau des actionneurs l'ordre de fabrication.

Incontestablement, la qualité globale de la commande résulte des performances obtenues au niveau de chaque classe d'automatisme. Cependant, les interactions omniprésentes et fortement accentuées par le mode de fonctionnement du type discontinu justifient le bien fondé d'une démarche unique et homogène de ces automatismes au cours des phases de **spécification, conception et réalisation**.

CHAPITRE II

CHAPITRE II**CARACTERISATION DES SYSTEMES DE PRODUCTION A ETATS CONTINUS - DISCRETS ET IDENTIFICATION DES STRUCTURES DE COMMANDE****INTRODUCTION**

Ce deuxième chapitre développe l'orientation de notre étude sur le thème des "systèmes discontinus". En s'appuyant sur les résultats de travaux entrepris autour du projet "C.A.S.P.A.I.M : Conception Assistée de Système de Production Automatisée en Industrie Manufacturière", notre travail consiste à analyser les possibilités d'ouverture des approches proposées pour les systèmes à événements discrets, en particulier les systèmes de production manufacturière, dans le domaine de supervision des **Systèmes à Etats Continus-Discrets (SECDs)**. Nous nous sommes intéressés depuis peu à cette catégorie de systèmes de production que l'on peut classer dans les systèmes dis-continus, hybrides par nature (voir § I.3.2.1).

Tout d'abord, il a été nécessaire d'effectuer une étude comparative des systèmes de production afin d'identifier les caractéristiques de ce que nous appelons "systèmes de production continus discrets". Une taxonomie de systèmes de production est engagée dans la première partie de ce chapitre. Elle nous a permis de dégager une classification liée à la structure de commande.

Notre champ d'investigation dans ce contexte s'est alors porté sur les systèmes de production dont la structuration de la partie commande met en évidence un niveau de commande logique contrôlant un niveau inférieur de processus élémentaires de nature continue. Les systèmes de production à traitements par lots ou systèmes de production "batch" nous intéressent alors plus particulièrement dans ce cadre pour leur automatisation qui requiert à la fois la maîtrise des automatismes continus et logiques. Cette réalité industrielle et ses multiples spécificités feront l'objet d'une présentation de l'état de l'art dans la seconde partie de ce chapitre.

Des concepts d'approche identifiés lors de cette spécification des systèmes automatisés batchs présentent des similitudes avec ceux que nous rencontrons dans le développement du système de commande pour les ateliers manufacturiers de production. L'idée d'une transposition de démarche de conception comme CASPAIM semble de ce fait parfaitement envisageable, particulièrement dans le cas d'un atelier pratiquant un mode de production flexible du type multi-flux multi-produits.

II.1 - TAXONOMIE DES SYSTEMES DE PRODUCTION

II.1.1 - INTRODUCTION.

Basées sur les approches de type systémique [LEMO90], de type organisationnel socio-économique [WOOD65], ou bien sur les critères de complexités et d'incertitudes [KIEF88] [POUR91], les principales classifications des systèmes de production adoptent une vue macroscopique ne permettant pas de rendre compte des détails et des différences conceptuelles de réalisation d'automatisme. Une analyse plus fine de cette activité doit s'appuyer sur des notions familières aux praticiens de l'automatique afin de dégager un cadre de référence clair et précis permettant de situer les catégories de systèmes de production les unes par rapport aux autres.

Notre démarche de classification [RAK92] est engagée dans ce sens. Elle repose sur les éléments prépondérants lors du développement de la partie commande, comme :

- le **produit** à élaborer,
- le **procédé et son architecture**,
- le **processus** qui, selon la nature du système de production, peut avoir une signification différente,
- les **techniques d'automatisation et d'informatisation** appliquées pour les phases de conception, de développement et d'implantation de la partie commande.

Deux grandes familles de systèmes de production apparaissent immédiatement. Ce sont :

- les systèmes de production à **transformation continue** issus d'un cadre plus large des Systèmes à États Continus SECs, par exemple la production d'énergie,
- et les systèmes de production **manufacturière**, usinage des pièces par exemple, relevant des Systèmes à Événements Discrets SEDs.

Cependant un nombre important d'ateliers de production n'appartiennent pas exclusivement à l'une ou l'autre de ces deux familles. Ils présentent des aspects mixtes au vu des éléments cités ci-dessus tels que :

- le produit qui change de structure pendant le cycle de fabrication. C'est le cas du passage de la phase fluide à la phase solide d'une coulée de verre suivi d'une découpe pour obtenir des objets solides : des bouteilles par exemple.
- une installation de production qui comporte une machine charnières transformant des objets solides en flux continu de matière (ou bien le cas de figure inverse transformant un flux continu de matière en objets solides).

- des fonctions de nature différente (logiques combinatoires, logiques séquentielles et continues) d'importance égale et de fortes interactions ne permettant pas d'effectuer une étude conceptuelle séparée de chaque sous-système. Citons l'exemple d'une régulation de température au cours d'une réaction exothermique pour la fabrication de PVC (Poly Vinil Chlorure) : un excès de température de 10°C multiplie par deux la vitesse de polymérisation et modifie la séquence normale des opérations élémentaires de traitement.
- la discontinuité de régime de fonctionnement voulue ou provoquée par des événements prévisibles et/ou aléatoires comme :
 - * le changement de fonctionnement (automatique, manuel) dans la conduite des réacteurs "batch",
 - * la commutation de mode de fonctionnement rencontrée lors du passage du mode normal en mode dégradé (apparition de dysfonctionnement).

Les événements de discontinuité se produisant pendant un cycle de fabrication ainsi que la nature et le type de changement provoqués se présentent sous de formes multiples dans les réalités industrielles. Cette troisième classe que nous allons désigner par l'appellation "**Systèmes de Production Continus-Discrets**", fait l'objet d'un nouvel axe de recherche au sein du laboratoire LAIL/Ecole Centrale de LILLE sur de possibles extensions de la méthodologie CASPAIM, destinée initialement aux systèmes de production manufacturière.

Avant de préciser les caractéristiques des SECDs, nous allons dégager les spécificités des systèmes de production à états continus et à états discrets.

II.1.2 - LES SYSTEMES DE PRODUCTION MANUFACTURIERS

L'approche événementielle [HO89] s'applique à une large classe de systèmes dont l'état évolue à des moments précis dans le temps en réponse à l'occurrence d'événements particuliers comme par exemple: "message reçu", "activation d'une tâche", "fin d'une tâche", "machine déclarée en panne", etc. Les systèmes de production manufacturiers présentent des caractéristiques communes aux SEDs que l'on rencontre tout aussi bien lors d'une démarche d'automatisation que lors de l'évaluation des performances d'un système automatisé existant.

II.1.2.1 - LE PRODUIT.

Le rôle essentiel de tout système de production est avant tout d'élaborer différents produits finis en quantité fixée.

II.1.2.1.1 - Caractéristiques d'un produit manufacturier de type solide.

Atomicité du produit.

Un produit manufacturier apparaît comme un objet concret. Il s'inscrit dans un volume indéformable. Son état physico-chimique est stable dans l'espace et dans le temps à l'image des solides. Cette nature "discrète", par essence, permet de localiser et de saisir le produit à tout moment du cycle de fabrication. Cet aspect atomique autorise aussi le dénombrement et l'identification de manière unique du produit.

Cette notion d'atomicité est aussi à la base des méthodes de suivi de fabrication basées sur des fiches suiveuses. L'idée des fiches suiveuses est de déporter vers le produit un certain nombre d'informations concernant son identité et le déroulement normal de son séjour dans l'atelier. Cette fiche permet alors à tout instant de retracer le passé, de connaître l'état d'avancement, et de prédire la vie future du produit. Cela permet d'alléger la partie commande de la tâche de reconstitution de l'état du produit en-cours à partir des données provenant des interfaces procédés. Cette possibilité permet aussi la gestion en temps réel des flux de différentes pièces circulant dans les installations afin d'optimiser des critères de coût (réduction du temps d'attente et de transit). C'est un atout essentiel qui aide à l'équilibrage des charges sur les postes de traitement et à la régulation du débit des en-cours sur les moyens de transport.

Référentiabilité du produit.

Le produit manufacturier fait l'objet d'une codification rationnelle et précise. Cette dernière représente une méthode d'organisation permettant de répertorier les articles selon une combinaison de critères de classement et d'identification. La qualité d'un système de codification [BENA87] est son unicité pour chaque article et la non ambiguïté dans son interprétation (code non redondant).

Cette codification traduit en fait la richesse de description du produit. Elle se présente souvent sous forme d'une arborescence de niveaux, de classes et d'attributs. Ainsi la nomenclature d'un produit se rapporte à ses particularités, à son appartenance à un premier niveau de groupement, à son attachement à une famille plus large, et ainsi de suite jusqu'à l'obtention d'une désignation unique.

Structure du produit

La structure d'un produit manufacturier renseigne sur la composition du produit à partir des éléments de base.

Elle peut être **simple**. Dans ce cas, le produit n'est pas alors décomposable (insécable). C'est le cas d'une pièce brute qui subit une série d'opérations élémentaires ne comportant aucune opération de type assemblage ou association. La pièce reste toujours atomique à la fin de chaque opération, et ne donne pas naissance à une nouvelle pièce de structure différente.

La structure peut aussi être **complexe**. La complexité résulte de l'assemblage d'un nombre fini de composants directs. Ces derniers, à leur tour, peuvent avoir une structure simple ou complexe. Cette association de composants doit respecter une contrainte de précedence stricte. Elle définit l'ordre des étapes de fabrication asynchrones des composants, et leur synchronisation finale pour réaliser l'assemblage.

L'atomicité des produits à structure complexe peut apparaître **virtuelle** au début de la fabrication. C'est le cas de produits dont les composants sont disséminés dans un atelier et ne seront assemblés qu'à des moments bien précis du cycle de fabrication. On peut avoir ce point de vue en considérant le lot d'objets, matérialisé par un chariot par exemple, acheminé vers un poste d'assemblage.

En résumé, on peut considérer qu'un produit manufacturier est **une entité de type objet** qui peut être décrit par un ensemble d'**attributs** et de **comportements**. Ses **comportements** représentent les facultés de mémoriser les actions subies, de connaître les opérations futures, de répondre à toute demande sur son état. **Les attributs** renferment des données nécessaires à la description du produit comme sa référence, sa localisation, ses dates d'entrée, ainsi que des informations complémentaires telles que des caractéristiques de qualité concernant par exemple la métrologie.

On peut ainsi attacher au produit un savoir renfermant une base de connaissances utiles pour l'élaboration de la commande. L'approche par "objectifs produits", proposée par des méthodologies de conception de la partie commande des ateliers manufacturiers, renforce cette constatation. Nous cherchons à réutiliser cette idée dans le contexte des SECDs.

II.1.2.2 - MODE ET PROCESSUS DE FABRICATION

II.1.2.2.1 - Mode de fabrication : traitement discontinu du produit.

Une installation manufacturière est constituée de machines de production reliées entre elles par des moyens de transport. Le produit à traiter reçoit les transformations effectives de manière discontinue. Ces transformations sont réalisées pendant un temps fini de passage à

chaque poste de traitement et lui apportent de la valeur ajoutée. Un déplacement du produit entre unités de traitement s'effectue avec un temps non productif¹.

De ce fait, bien que la considération des paramètres telles que la vitesse de traitement, la fréquence de passage de pièces peuvent donner un aspect continu au système manufacturier, l'**ajout de valeur** sur chaque produit est, par essence, **discontinue**. C'est à cette caractéristique fondamentale que les systèmes de production manufacturiers, de notre point de vue, doivent leur appartenance à la classe des systèmes à événements discrets.

II.1.2.2.2 - Processus de fabrication.

Nous entendons sous ce terme l'ensemble des actions élémentaires contribuant à l'ajout de valeurs au produit initial pour obtenir le produit fini. Ces actions dont les définitions sont explicités en annexe peuvent être classée selon les types d'opération suivants :

- **opérations de transfert.**
- **opérations de transformation** (usinage, ...).
- **opérations de modification de structure** (assemblage, ...).
- **opérations informationnelles** (métrologie, ...).

Nous tenons à souligner aussi l'importance des **opérations de stockage**. Elles offrent une meilleure alternative dans l'attente de la disponibilité d'un poste tout en libérant un emplacement physique des moyens de transport.

II.1.2.2.3 - Gammes de fabrication et considérations conceptuelles.

La description fonctionnelle du processus de fabrication manufacturière définit un sous-ensemble ordonné d'opérations citées ci-dessus. Cette séquence de fonctions élémentaires que nous appelons "**gamme**", respecte des contraintes de précédence qui garantissent l'obtention du produit final.

Une gamme de fabrication peut être **simple** ou **complexe**. La complexité est souvent due au nombre d'opérations élémentaires qui peut augmenter démesurément en fonction du nombre de composants à assembler. Elle peut aussi provenir de la possibilité de permuter l'ordre d'exécution d'un certain nombre d'opérations. C'est le cas des **gammes flexibles**. Cette caractéristique de flexibilité est souvent source d'explosion combinatoire lorsqu'on essaie de représenter tous les choix de réalisations possibles sur une architecture d'atelier donnée.

¹ Dans certains types de fabrication, les temps non productifs peuvent s'évaluer de 70% à 95% du cycle de fabrication.

Dans une élaboration méthodologique de la commande de coordination, une description de haut niveau de la gamme de fabrication permet de faire une abstraction de la partie opérative. Cette description appelée **gamme logique** permet la fabrication sur une architecture d'atelier quelconque. L'obtention d'une description exécutable sur une configuration particulière de machines, appelé **gamme opératoire**, nécessite l'expansion et l'enrichissement de la gamme logique pour intégrer les contraintes structurelles de la partie opérative. La figure fig.2.1 montre un exemple de traduction d'une gamme logique d'une pièce à tourner sur une structure d'installation pour obtenir un modèle de réalisation effective de la pièce.

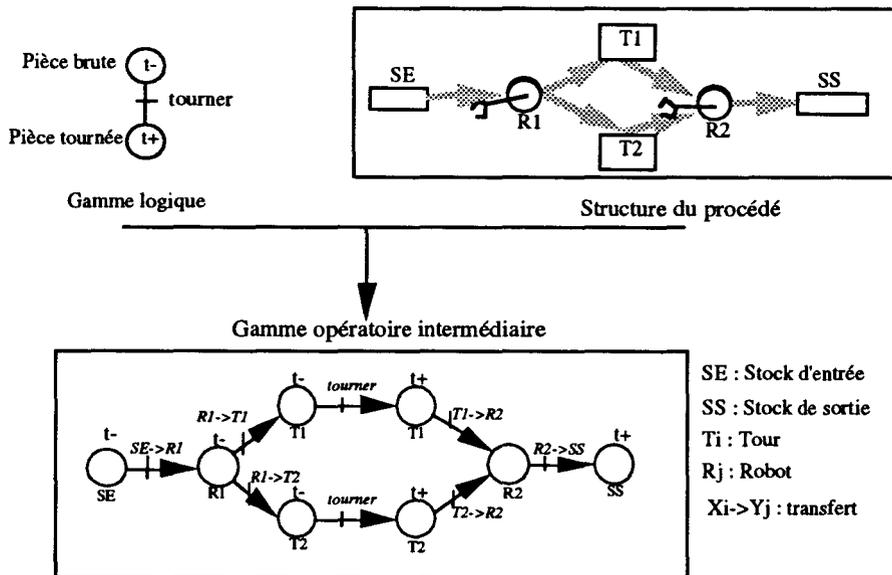


fig.2.1 - Exemple d'obtention d'une Gamme Opératoire pour une simple opération de tournage

II.1.2.3 - RESSOURCES ET PROCÉDÉ DE FABRICATION

II.1.2.3.1 - Ressources de fabrication.

La notion de ressource signifie dans cette étude les moyens physiques de production avec les services qu'ils proposent pour l'élaboration du produit. Nous distinguons alors deux sortes de ressource vues du produit :

a - les ressources élémentaires.

Une ressource est **élémentaire** si elle ne comporte qu'un seul et unique lieu physique. Elle ne peut être affectée de manière exclusive qu'à un et un seul produit à un instant donné. Elle ne peut offrir à un instant donné son service qu'à un seul et unique produit.

C'est le cas d'un poste d'usinage qui n'agit, à un instant donné, que sur une seule pièce, ou encore le cas d'un robot mono-pince qui transporte un seul objet à la fois.

b - les ressources complexes.

Une ressource complexe, par contre, comporte un nombre fini de lieux physiques. Il est possible alors de choisir un produit d'un lieu physique donné et d'effectuer l'opération qu'il sollicite. La complexité de ce deuxième type de ressource revient, en fait, à la complexité de la gestion des demandes d'accès aux différents lieux physiques qu'elle contient.

Citons quelques ressources complexes significatives :

- un stockeur rotatif comportant un grand nombre de lieux physiques de stockage.
- un système de monte-charge se déplaçant entre un certain nombre d'étages.
- un système de transfert flexible (réseau de convoyeurs) qui dessert une multitude de postes de transformation distincts.

Une nouvelle idée apparaît alors sur la nécessité de modéliser l'état et le comportement d'une ressource complexe. La complexité relève à la fois du parallélisme et de la simultanéité des opérations à effectuer sur différents produits. La coordination de telles opérations réclame de nombreuses prises de décisions pour résoudre les conflits d'accès à une ressource partageable et pour résoudre les indéterminismes dus au choix de routage.

II.1.2.3.2 - Procédé de fabrication.

Le procédé représente l'ensemble des équipements qui entrent en interaction directe avec le produit à élaborer. La disposition de ces moyens de production dans l'atelier fait l'objet d'une étude préalable sur leur répartition, leur regroupement pour constituer des cellules, des îlots de machines selon leur dépendance fonctionnelle. On assiste actuellement, pour des raisons d'origine économique, à une architecture de procédé résultant d'un compromis de machines à fonctions multiples mais en nombre limité, interconnectées par un réseau de moyens de transport. De ce fait, nous constatons que :

- les ressources sont, le plus souvent, fonctionnellement paramétrables. Elles peuvent réaliser différents types d'opérations selon la diversité de la demande.
- plusieurs opérations indépendantes peuvent être simultanément réalisées en plusieurs postes de transformation. L'analogie avec le parallélisme au sens informatique (exécution simultanée par une unité centrale des tâches relativement indépendantes ne communiquant que sur occurrence d'événements) est à souligner ici. **Ce parallélisme identifié dans la gestion des opérations élémentaires SEDs signifie**

C'est le cas d'un poste d'usinage qui n'agit, à un instant donné, que sur une seule pièce, ou encore le cas d'un robot mono-pince qui transporte un seul objet à la fois.

b - les ressources complexes.

Une ressource complexe, par contre, comporte un nombre fini de lieux physiques. Il est possible alors de choisir un produit d'un lieu physique donné et d'effectuer l'opération qu'il sollicite. La complexité de ce deuxième type de ressource revient, en fait, à la complexité de la gestion des demandes d'accès aux différents lieux physiques qu'elle contient.

Citons quelques ressources complexes significatives :

- un stockeur rotatif comportant un grand nombre de lieux physiques de stockage.
- un système de monte-charge se déplaçant entre un certain nombre d'étages.
- un système de transfert flexible (réseau de convoyeurs) qui dessert une multitude de postes de transformation distincts.

Une nouvelle idée apparaît alors sur la nécessité de modéliser l'état et le comportement d'une ressource complexe. La complexité relève à la fois du parallélisme et de la simultanéité des opérations à effectuer sur différents produits. La coordination de telles opérations réclame de nombreuses prises de décisions pour résoudre les conflits d'accès à une ressource partageable et pour résoudre les indéterminismes dus au choix de routage.

II.1.2.3.2 - Procédé de fabrication.

Le procédé représente l'ensemble des équipements qui entrent en interaction directe avec le produit à élaborer. La disposition de ces moyens de production dans l'atelier fait l'objet d'une étude préalable sur leur répartition, leur regroupement pour constituer des cellules, des îlots de machines selon leur dépendance fonctionnelle. On assiste actuellement, pour des raisons d'origine économique, à une architecture de procédé résultant d'un compromis de machines à fonctions multiples mais en nombre limité, interconnectées par un réseau de moyens de transport. De ce fait, nous constatons que :

- les ressources sont, le plus souvent, fonctionnellement paramétrables. Elles peuvent réaliser différents types d'opérations selon la diversité de la demande.
- plusieurs opérations indépendantes peuvent être simultanément réalisées en plusieurs postes de transformation. L'analogie avec le parallélisme au sens informatique (exécution simultanée par une unité centrale des tâches relativement indépendantes ne communiquant que sur occurrence d'événements) est à souligner ici. **Ce parallélisme identifié dans la gestion des opérations élémentaires SEDs signifie**

L'indépendance des tâches en exécution sur les ressources qui leur sont allouées.

- les contraintes de limitation en nombre de ressources nécessitent l'arbitrage d'un niveau décisionnel afin de répartir leur utilisation pour un certain nombre de produits concurrents.

II.1.2.4 - DYNAMIQUES DES PRODUITS ET RESSOURCES.

Nous entendons par dynamique d'un produit ou d'une ressource son évolution, ses comportements et ses échanges avec son environnement sur un horizon temporel fini qui est le cycle de fabrication.

II.1.2.4.1 - Dynamiques du produit.

Une caractéristique de l'évolution d'un produit manufacturier en cours de fabrication est sa dépendance totale aux ordres émanant du système de conduite. Le produit ne change d'état qu'après exécution d'une commande discrète émise soit par la partie commande soit par un opérateur de conduite. Des conséquences directes découlent de ce fait telles que :

- l'état physique du produit reste invariant sur les lieux de stockage,
- les opérations de transport ne provoquent pas des modifications incontrôlées sur l'état physique courant du produit,
- seules les opérations de traitement et d'assemblage prévues dans la gamme font évoluer l'état physique du produit.

L'évolution du produit est alors parfaitement dépendante du comportement maître et déterministe du système de commande. Ceci exclut toute considération d'un éventuel phénomène perturbateur externe et non prévu pouvant modifier la gamme de fabrication. Un phénomène aléatoire comme l'occurrence d'une panne sur un poste de traitement est supposé ici pris en considération dans la dynamique de la ressource.

Ainsi, la partie commande est maître de l'ordre de lancement en fabrication, du choix des opérations et du lieu où les réaliser, de la date de début de chaque opération de la gamme.

II.1.2.4.2 - Dynamiques de la ressource.

Le déroulement d'une opération élémentaire sur une ressource est **indépendante** de celles qui ont lieu simultanément sur le reste du procédé. Prenons l'exemple d'une opération de fraisage sur une machine outil (MOCN), qui s'effectue indépendamment de l'évolution des

autres opérations sur d'autres ressources, comme par exemple une opération de transfert sur un convoyeur ou une opération de tournage sur une autre MOCN. Nous formulons ici un **parallélisme indépendant et asynchrone des processus élémentaires** mis en oeuvre lors de la fabrication.

Chaque opération élémentaire agit sur le produit en utilisant une partie bien définie du procédé : lieu physique. Ces lieux physiques servent de supports indispensables à l'exécution de chaque opération. Ces **lieux physiques d'exécution** sont **isolables** et délimitent la portée de chaque opération du reste du procédé. Par exemple le poste de tournage, matérialisé par une MOCN, isole le processus d'usinage du reste de l'installation.

II.1.2.4.3 - Interaction entre dynamique du produit et de la ressource.

L'utilisation effective d'une ressource partageable demande une gestion appropriée. Elle doit tenir compte à la fois de l'état courant de la ressource (occupé, libre, indisponible,...) , de sa capacité (quantité en lieux physiques, vitesse, ...) et du nombre de demandes d'accès. L'allocation d'une ressource à un produit prend effet à l'issue d'une interprétation de données telles que la représentation comportementale de la ressource, des requêtes d'accès, leur ordre de priorité et la stratégie d'allocation adoptée.

La mise en oeuvre effective d'une ressource requiert alors un protocole d'accès composé, en général, de cinq étapes (voir annexe.2). Ce mécanisme d'allocation ne constitue en fait qu'une étape particulièrement intéressante du point de vue de la coordination.

En résumé, nous retenons de cette analyse sur la dynamique des processus manufacturiers **l'atomicité des opérations élémentaires sur des lieux physiques isolables**. Cette caractéristique induit alors **un parallélisme indépendant et asynchrone** des tâches en cours d'exécution perçu au niveau coordination/supervision du système de commande.

II.1.2.5 - MODELE, MÉTHODOLOGIE DE DÉVELOPPEMENT

II.1.2.5.1 - Modèle d'atelier et classes de commande associées

Une architecture de référence plus adaptée aux systèmes de production manufacturière s'inspire du modèle hiérarchique du NBS¹ [BROW87]. Elle distingue, en général, quatre niveaux (fig.2.2) qui définissent des fonctions et des données bien spécifiques :

- Le niveau atelier : fonction de gestion technique

Pour ce niveau et pour les niveaux supérieurs, on ne parle pas exactement de commande. Les fonctions rencontrées relèvent plus de la gestion de production et de la planification à moyen et à long terme. Les différences fondamentales entre commande SED et SEC s'estompent à partir de ce niveau. Les particularités d'un système de production sont plutôt liées aux types de produits à fabriquer (DAO, CAO, CFAO du produit) et aux stratégies de production dictées par le marché (GPAO) qu'à la nature continue ou événementielle du procédé.

- Le niveau cellule : fonction de supervision et de surveillance

Il comporte un premier niveau réel de commande typique des systèmes manufacturiers. Ses particularités se distinguent par les fonctions de **pilotage** et de **coordination**. La coordination consiste à gérer le séquençement des différentes opérations à effectuer sur chaque produit (suivi des gammes opératoires). Elle se traduit par la gestion du parallélisme issu du traitement simultané des gammes et la synchronisation d'accès aux ressources. L'allocation effective d'une ressource requiert par contre un module de pilotage qui va se charger de la résolution des conflits et des indéterminismes d'acheminement sur un réseau de transport flexible.

- Le niveau îlot : fonction de commande

La portée de cette commande reste locale à une ressource. Ce niveau de commande effectue une interprétation de l'ordre venant du niveau cellule, une décomposition en séquence de commandes fines, l'exécution des commandes fines compatibles avec l'état courant du procédé et le renvoi du résultat de l'exécution vers le niveau supérieur. Une commande fine peut être par exemple le choix des programmes d'usinage par émissions de requêtes paramétrées vers une MOCN.

- Le niveau machines, capteurs et actionneurs

La différence notable de ce niveau de commande par rapport au niveau 0 d'un système unitaire de production (§ I.1.3) est l'existence d'équipements évolués : ils sont autonomes dans l'accomplissement des tâches demandées et capables d'évaluer les résultats d'exécution pour les signaler au niveau 1.

¹ NBS : National Bureau of Standard

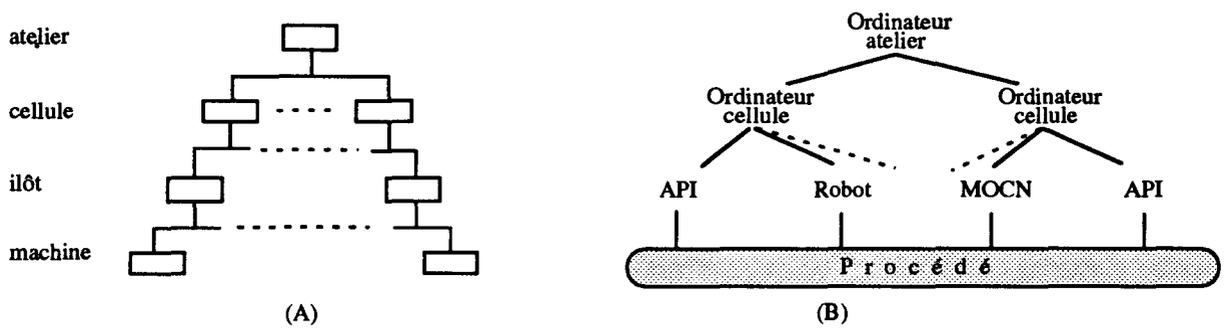


fig.2.2 - A : Modèle hiérarchique du NBS. B - Modèle fonctionnel d'un atelier.

Nous nous sommes intéressés principalement à la conception de la commande du niveau de coordination-supervision avec son niveau décisionnel (niveau 2) et de la commande de niveau local (niveau 1). Ces deux classes de commande représenteront le terme "partie commande" dans la suite de ce chapitre.

II.1.2.5.2 - Méthodologie de conception de la partie commande .

La spécificité de la démarche de conception faite dans le projet CASPAIM repose principalement sur le développement de la commande de coordination et le pilotage des ressources à partir d'une ossature "**modèle produit**".

En fait, la démarche s'appuie sur deux modèles de spécifications indépendantes :

- spécification fonctionnelle du processus de fabrication. Le produit est alors traduit en graphe fonctionnel selon un formalisme RdP (obtention de la gamme logique),
- spécification opérationnelle de la structure de l'atelier de fabrication.

L'exploitation de la gamme logique par une opération d'enrichissement et d'expansion afin d'intégrer les contraintes structurelles et les lieux physiques de transit aboutit à l'obtention d'une gamme opératoire spécifique à un atelier donné.

L'ajout des mécanismes d'accès et de retrait des ressources, et l'ajout des lieux physiques (protocole d'accès) va fournir un graphe de commande qui sera effectivement traduit en langage de calculateur (ADA par exemple [HUYE92]) ou d'API¹ (Le Grafset par exemple [CRAY89]).

¹ API : Automates Programmables Industriels

L'intérêt premier de la démarche est son approche progressive par étapes. Elle est conforme à la conception préconisée par le génie automatique. Les modèles RdP utilisés dans chaque étape offre l'avantage d'une facilité d'intégration et de possibilités de traduction du graphe de commande généré en commandes exécutables. Le modèle uniforme permet également la validation formelle de chaque phase de conception.

La séparation de la spécification du produit et des moyens de production présentent des avantages incontestés :

- la modification de la structure de la partie opérative (ajout ou défaillance d'un équipement) n'affecte pas la spécification fonctionnelle,
- la flexibilité maximale de ressources et de la gamme est respectée.

Le schéma général de cette démarche est représenté ci-dessus :

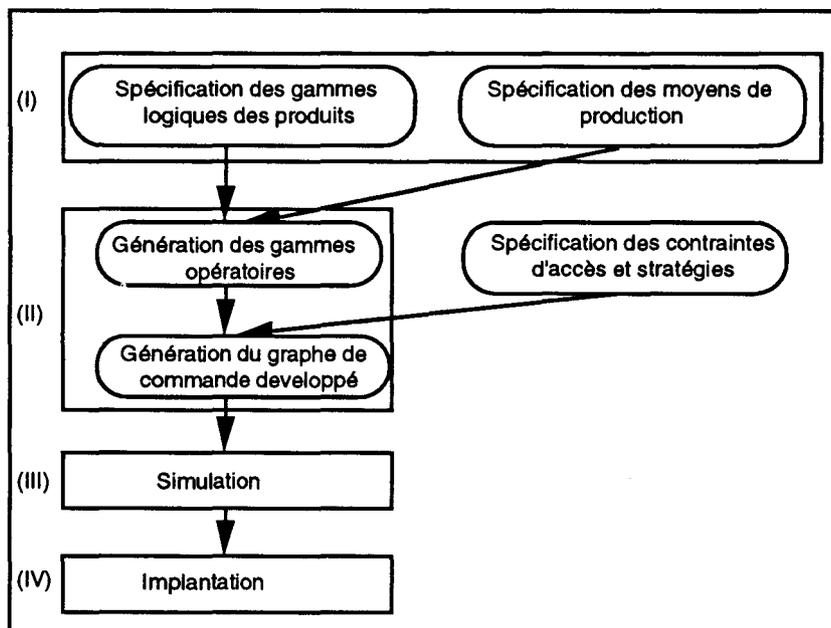


fig.2.3 - Démarche de conception d'une approche par "produit" : CASPAIM 2

II.1.2.6 - FACTEURS DE COMPLEXITE

En résumé de cette présentation des spécificités aux systèmes de production manufacturiers, nous retenons les principaux facteurs de complexité qui sont prépondérants lors de la conception et l'exploitation de la partie commande :

- les facteurs issus du produit sont le **nombre de gammes** à fabriquer simultanément et la **complexité de chaque gamme** en nombre, en nature des opérations

élémentaires ainsi que la possibilité de les permuter. Cette complexité est étroitement liée à la **notion de flexibilité de la gamme**.

- les facteurs issus du procédé sont les **contraintes opérationnelles** telles que
 - * le nombre limité de ressources partageables,
 - * l'existence des ressources complexes qui nécessitent une modélisation comportementale spécifique,
 - * le degré de liberté dans le choix des chemins de parcours entre les unités de production.

Cette seconde difficulté est plutôt due à la **notion de flexibilité des ressources** de transport et du paramétrage possible des ressources simples.

- une difficulté relève aussi de l'**impossibilité de définir de manière précise dans le temps** la séquence de lancement en fabrication des produits bruts en fonction :
 - * de leur gamme,
 - * l'état de charge courante de l'atelier tout en respectant le délai de fabrication imposé.
- à court terme, une grande difficulté se pose pour définir les critères d'élaboration des ordres de priorité et des stratégies de choix nécessaires pour la gestion en temps réel du parallélisme, de la résolution des conflits (limitation en nombre des ressources) et des indéterminismes (choix multiples).

Pris au sens large, il apparaît une autre forme de complexité que nous allons attribuer à la flexibilité globale du système. Le comportement global de tels systèmes est de fait non déterministe. En effet, les techniques de planification et d'ordonnancement ont tendance à simplifier le modèle de comportement du système, notamment en se ramenant à un contexte déterministe permettant d'effectuer des analyses prédictives. La complexité du système relevant d'une large part de ses différents niveaux de flexibilité (flexibilité des gammes, des ressources) conduit à piloter en fait un système pour lequel de nombreux conflits et indéterminismes sont susceptibles d'apparaître en temps réel. Le modèle d'analyse et de prise de décision temps réel n'est donc plus déterministe. Il convient dans ce cas de faciliter les prises de décision au niveau de la commande de coordination. Cette idée sera réutilisée dans le contexte des SECDs.

II.1.3 - LES SYSTEMES DE PRODUCTION CONTINUS.

Intuitivement, les systèmes de production continus sont associés à un mode de fabrication à flux équilibré d'une matière entrante et d'une matière sortante. La production peut fonctionner de manière continue sur une longue période. Les opérations de transformation agissent sur un flux de matière toujours en déplacement.

Dans la réalité industrielle, nous remarquons deux types de production :

- une production d'énergie soit de l'électricité ou de la chaleur,
- une production de matière: fonte, verre, ciment, etc.

II.1.3.1 - CARACTERISTIQUES DU PRODUIT.

Que ce soit de la production d'énergie, de la matière ou de flux continu d'objets solides, le produit est ici difficilement discernable au sens d'une entité atomique élémentaire. Certes à l'échelle individuelle (pour un flux continu d'objets solides) ou microscopique (pour un flux de matière fluide), les objets ou les molécules présentent un caractère discret mais cette considération n'apporte pas d'intérêt significatif dans la production continue de grande quantité et encore moins dans une démarche d'automatisation d'un tel système.

Dans la production de matière, le produit est dans un **état physique d'instabilité** perpétuelle. Sous forme de fluide (liquide ou gaz), il prend la forme des conduits d'amenée et des réservoirs et, subit des transformations tout le long de la ligne de fabrication. Remarquons ici une caractéristique de la dynamique du "produit continu" qui évolue aussi bien dans les réservoirs de stockage et les tuyaux de transport (donc sans action de la partie commande) que dans les unités de transformation (due aux actions voulues par la partie commande).

Dans la production continue d'énergie, le produit n'a qu'une réalité **virtuelle**, manifestant son existence par des effets physiques.

Dans la transformation continue de flux d'objets solides, le statut de produit est plutôt attribué à la quantité par unité de temps à transformer en mouvement que l'entité solide constituant le flux.

Comparé au produit manufacturier, le produit est **faiblement descriptible**. La puissance, la tension, la fréquence sont souvent les principales grandeurs de quantification de production d'électricité. Le débit, le triplet (température-pression-volume) et des grandeurs de qualité spécifiant les propriétés physico-chimiques comme le ph, la résistance, la réactivité, etc. sont utilisés pour caractériser la matière.

En résumé, la notion de produit n'apparaît plus ici comme porteur d'un savoir utile au processus de fabrication ni porteur d'informations fondamentales à la conception de la partie commande mais plutôt comme simple point de mesures et, de vérification des effets de la commande et des perturbations externes.

II.1.3.2 - CARACTERISTIQUES DES PROCESSUS CONTINUS.

Le processus qui, réellement, se manifeste par des phénomènes "physiques" au sein des unités de production, a un sens plus pertinent dans l'automatisation des SECs. Il est privilégié par les automaticiens dans la conception de la commande aux dépens du produit. Il fait l'objet d'une modélisation de son comportement, sur une base de temps, de son état interne et de ses échanges avec l'extérieur. Des bases théoriques et des formulations mathématiques sont utilisées pour représenter les caractéristiques comportementales et analyser les propriétés des modèles obtenus.

II.1.3.2.1 - Coopération instantanée et dépendante - parallélisme au sens SEC.

En prenant le cas classique d'une centrale thermique (fig.2.4), on sait que le produit "électricité" s'obtient par transformation de l'énergie calorifique fournie par la production de vapeur (cycle vapeur) en énergie électrique par l'intermédiaire du couple turbine-alternateur. La génération de vapeur produite par la chaudière, ses dispositifs annexes et la génération d'électricité sont totalement dépendants à tout instant.

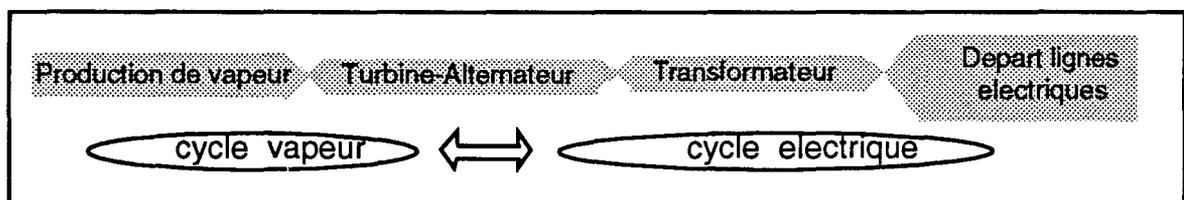


fig.2.4 - Ligne principale de production d'électricité.

Les sous-processus mis en oeuvre au cours d'une production continue, à l'image des sous-processus "production vapeur", "transformation d'énergie calorifique en énergie électrique", "transformation de tension et intensité" sont liés par une association synergique de leur action. Leur fonctionnement doit être **simultané** et **dépendant** pour obtenir le produit final. La défection d'un sous-processus de la chaîne porte atteinte au bon fonctionnement de l'ensemble.

On qualifie alors l'ensemble du système de "**multivariable**" dont l'état instantané est représenté par un vecteur d'état de dimension finie. Nous traduisons cette caractéristique, au sens informatique, par un **parallélisme instantané et dépendant** des tâches représentées par les sous-processus. Cette forme de parallélisme sera appelée par la suite "parallélisme au sens SEC" ou "parallélisme analogique".

II.1.3.2.2 - Une réactivité de faible délai.

Les processus continus sont réactifs aux variations de consigne dans le but de minimiser l'écart entre le fonctionnement réel et la trajectoire souhaitée. Ils réagissent promptement aux perturbations dégradantes venant de l'extérieur pour maintenir le consigne imposé. Les processus sont alors **irréversiblement liés au temps**. Ce dernier, perçu comme continu ou échantillonné, définit le référentiel de base unique pour tout processus de l'ensemble.

Le temps revêt ici un **aspect uniforme**. En effet, les composantes du vecteur d'états multivariés sont évaluées sur une même base temporelle. Nous pouvons formuler alors une hypothèse à priori de **synchronicité d'évolution** de chaque sous-processus sur le même temps ou les "tops" d'une horloge de référence.

II.1.3.2.3 - Processus peu paramétrables.

Les processus continus sont faiblement paramétrables. Dans la production d'énergie par exemple, ils sont commandés de manière à satisfaire les variations de demande en puissance ou quantité de chaleur. Les paramètres de production se réduisent aux grandeurs qualitatives ou quantitatives du même produit. En effet, il est impossible de changer la nature de la production : on ne peut agir que sur quelques paramètres comme le débit, la puissance, etc.

II.1.3.3 - PROCEDE ET MODE DE FABRICATION

Dans bon nombre d'exemples typiques, les moyens physiques de production sont disposés selon une structure caractéristique qui est immuable. Les unités de transformation, souvent de dimension importante (exemple de haut-fourneau), sont dédiées à des opérations spécifiques. Elles forment une ligne de fabrication figée pendant la fabrication. La matière reçoit alors de la valeur ajoutée de manière continue. Les temps transitoires non productifs sont dans ce cas très faibles¹ par rapport au temps total de fabrication..

¹ Dans certains types de fabrication, Le temps non productifs ne dépasse pas 20% du cycle de fabrication.

Cette rigidité et cette dépendance structurelle contribuent en grande partie au caractère d'un système de production sensible aux pannes de ces unités constitutives. L'arrêt d'un élément quelconque de la chaîne entraîne à fortiori des répercussions immédiates pouvant porter atteinte au fonctionnement normal de l'ensemble. La solution à configuration redondante des éléments stratégiques, qui est en fait significative de cette fragilité structurelle, est souvent constatée dans bon nombre de procédés continus.

II.1.3.4 - MODELE ET CONCEPTION DE LA COMMANDE.

La commande évoquée ici concerne principalement celle du niveau 1 et 2 (voir §.I.1.3 et fig.1.5) qui s'échangent de consignes à respecter et les effets des perturbations externes à corriger.

II.1.3.4.1 - Conception de Commande SEC.

La phase importante de la conception de la commande est consacrée à la **modélisation de la partie opérative**. L'identification et la formalisation des lois définissant la dynamique du processus sont des conditions sine qua non de réussite d'un projet d'automatisation de tels systèmes. Les principales étapes dans cette démarche sont, en général :

a - Étape de spécification du cahier des charges.

Il s'agit de définir les frontières "physiques" du procédé à étudier et les conditions d'environnement de fonctionnement. Sans être exhaustif, cette spécification doit fournir également des informations sur :

- les variables d'entrée,
- la nature des perturbations et leurs effets,
- les variables de sorties,
- les performances attendues,
- les différents modes de conduite possible et l'interface unité-opérateur.

b - Étape de recherche de modèle.

Il consiste à faire des hypothèses a priori sur le fonctionnement des phénomènes "physiques" ou à établir une relation mathématique déduite des lois physiques connues pour définir l'état du système. Cette action nécessite une bonne connaissance du procédé ou bien une campagne de mesures. Le modèle retenu sera affiné en ajustant les paramètres caractéristiques afin de prendre en compte la réalité du processus. Cette phase d'identification revient à minimiser l'écart entre le modèle et le processus réel.

c - Étape de simulation et validation.

L'évaluation des performances (stabilité, robustesse, anticipation, ...) du modèle soumis à des conditions de fonctionnement réel permet de le valider ou de le rejeter et par conséquent dans ce dernier cas de revenir sur une des étapes antérieures.

d - Conception et réalisation de la commande.

Les étapes restantes concrétisent les efforts fournis précédemment. Il s'agit alors de définir les contrôleurs à intégrer dans la commande de processus. Cette réalisation peut aller d'une simple opération d'assemblage et de paramétrage de composants matériels et logiciels préexistants jusqu'à la réalisation d'un système informatique complexe temps réel comportant des difficultés algorithmiques, de numérisation, de parallélisme, etc.

Nous tenons à remarquer ici une caractéristique fondamentale d'un système de commande "automatique" qui est de satisfaire à tout instant les consignes et les contraintes de production en s'adaptant par réaction instantanée aux perturbations externes. La structure de commande/contrôle est donc elle-même de nature continue pour pouvoir réagir instantanément aux perturbations perçues sur le procédé. Ceci nécessite une analyse permanente d'un grand nombre de signaux.

II.1.3.5 - FACTEURS DE COMPLEXITE.

Sans être exhaustif, les difficultés rencontrées dans l'automatisation des SECs sont principalement liées :

- a - à la taille du système de production à étudier. De dimension importante, le système renferme un grand nombre de sous-systèmes en interaction étroite. La modélisation doit alors tenir compte d'un nombre important de variables d'état qui sont parfois mal connus et difficilement instrumentables.
- b - à la nature et aux caractères non linéaires de ces interactions. Les lois qui définissent ces interactions peuvent être complexes. Ces deux facteurs impliquent souvent une difficulté à formaliser de manière explicite la dynamique du processus. Et de plus, tout modèle comportemental identifié n'est valable qu'autour d'un point ou zone de fonctionnement bien défini.

- c - à la réactivité de la commande. Elle doit instantanément réagir à l'évolution de l'état du processus piloté.
- d - à la nécessité d'une implantation répartie d'un système de commande qui doit réaliser un parallélisme de type "analogique" avec un matériel informatique conçu pour un fonctionnement de type "discret" donc plus adapté à une forme de parallélisme "discret".
- e - à la surveillance du bon fonctionnement du processus en exploitation qui, à fortiori, ne tolère pas les pannes. La détection, l'identification, le diagnostic et le recouvrement des défaillances qui sont de nature aléatoire s'avèrent d'une nécessité de premier ordre mais qui n'ont pas été tenu compte dès les premières phases de modélisation du procédé.

II.1.4 - DIFFÉRENCES ESSENTIELLES ENTRE SEC ET SED.

De nombreuses différences perceptibles d'un point de vue conception et exploitation de la commande particularisent chaque classe de système de production SEC et SED. Nous ne retiendrons que les points suivants qui apparaissent, à notre point de vue, les plus importantes :

- la notion de produit est essentielle pour la conception de la commande d'un SED. Son importance est beaucoup plus réduite pour la conception des commandes d'un SEC. La notion de gamme de fabrication et de ressource physique représentent des éléments de base pour la modélisation de la commande d'un SED. Les processus physiques au sein des unités de transformation font, par contre, l'objet d'une étude d'identification des lois d'évolution pour la conception des commandes SECs. Ces processus physiques sont globalement transparents pour les concepteurs de commande SED qui ne tiennent compte que les événements de début, de fin, et des comptes rendus d'exécution.
- l'analyse des performances de ces deux systèmes est également très différente. Pour les processus SEC, il s'agit surtout d'assurer la robustesse de la commande pour un processus évoluant dans un milieu non idéal. Pour les SEDs, il s'agit d'assurer, pour différents flux de produits évoluant sur une même installation, le respect des ratios et des dates de fin au plus tard de fabrication.

- la nécessaire synchronicité temporelle et instantanée des tâches d'un SEC qui se démarque de l'asynchronisme et l'indépendance relative des opérations élémentaires SEDs. Cette constatation nous conduit à formuler deux formes de parallélisme :
 - i - un parallélisme analogique qui repose sur une référence de temps unique. La synchronicité de tout processus continu sur une même horloge est alors à la base de la notion du parallélisme SEC. **Le temps est alors uniforme.**
 - ii - un parallélisme au sens de l'informatique basé sur l'asynchronisme des tâches à références temporelles distinctes. **Le temps revêt alors un aspect multiforme.** La notion de parallélisme SED repose ainsi sur l'exécution simultanée des tâches relativement indépendantes pouvant se communiquer de manière transitoire sur l'occurrence d'événements.

Bien qu'une réelle différence existe entre les méthodes, modèles et outils de conception de la commande, nous ne retiendrons cependant que ces deux derniers points pour souligner leur différence sémantique. En effet, une large partie des méthodes et des théories de l'automatique classique est basée sur la synchronicité décrite en i. Il reste cependant que la surveillance relève fondamentalement d'un cadre asynchrone en raison du caractère aléatoire des événements à prendre en compte. Le niveau de commande de supervision prend par conséquent un aspect asynchrone.

II.1.5 - LES SYSTEMES DE PRODUCTION A ÉTATS CONTINUS - DISCRETS

Les SECDs font apparaître de façon diverse les ordres de complexité évoqués précédemment et plus particulièrement l'interaction des deux états continus et discrets. Les éléments de classification précédents empruntent à la fois les définitions attribuées aux SEDs et SECs.

Afin de mieux discerner les formes d'interaction entre les deux systèmes, nous allons tout d'abord établir une architecture morphologique de référence des systèmes continus-discrets. L'étude effectuée au niveau de la gestion des processus du niveau coordination et de supervision de la partie commande nous amène à différencier deux cas de figures :

- les systèmes continus-discrets marqués par un fort couplage entre les aspects continus et discrets qui conduisent forcément à une démarche spécifique aussi bien pour les outils et modèles de conception que pour les méthodes de structuration.
- les systèmes mixtes qui permettent d'isoler les deux composantes (aspect continu et discret) et d'effectuer une structuration du niveau de coordination/supervision.

Dans ce second cas, l'existence des processus élémentaires continus évoluant sur un horizon temporel fini ouvre effectivement une voie rendant possible une approche de type SED pour leur coordination/supervision. Nous proposons de définir plus finement dans ce qui va suivre cette forme de systèmes continus-discrets.

Nous allons distinguer deux exemples de systèmes de production continus-discrets :

- les systèmes de production qui sont en forte interaction avec l'énergie dans la transformation de la matière avant sa solidification et la séquence d'opérations de traitement sur les objets solides résultant. Exemple : fabrication de bouteilles à partir du sable qui va être fondu pour alimenter en coulée de verre des moules (fig.2.5).
- les systèmes de production où l'utilisation de l'énergie est localisée dans les processus élémentaires de transformation de la matière. Le produit final est toujours un objet manufacturier obtenu à la suite d'une opération de conditionnement. Exemple : fabrication de poudre de lessive par réaction chimique et mélange d'additifs (fig.2.6).

II.1.5.1 - Le Produit continu-discret.

Deux classes de produits continus-discrets peuvent être distinguées.

Une première qui regroupe les produits qui subissent un changement de nature de transformation : passage d'un traitement en continu à un traitement de type manufacturier. Le cas de figure inverse fait également partie de cette classe par raisonnement symétrique. Le produit est alors transformé puis alimente des ressources physiques charnières avec une vitesse non nulle. Les ressources physiques charnières discretisent l'alimentation continue compte tenu de leur capacité limitée, et délivrent un flux discontinu de produits manufacturiers (fig.2.5).

Pour la seconde classe, les caractères continus-discrets du produit ne sont perçus que dans une vue logique. Le produit se présente physiquement sous forme de flux continu de matière fluide ou d'objets élémentaires mais en quantité finie. L'ajout de valeur sur une quantité finie de produit continu s'effectue alors localement durant le passage du produit dans les ressources de transformation unitaires (fig.2.6).

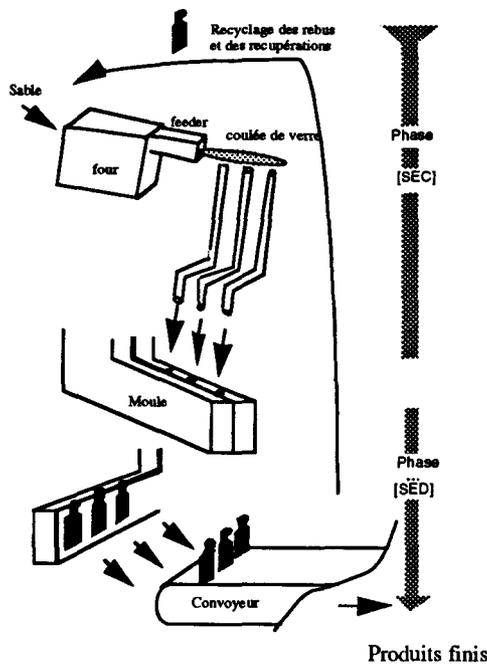


fig.2.5 - Ex 1 : fabrication de bouteilles

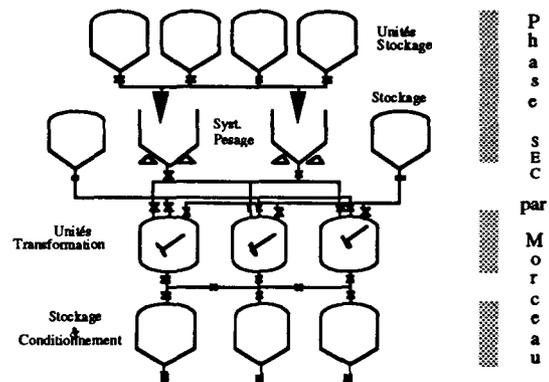


fig.2.6 - Exemple 2 : fabrication de poudre.

Alors peut-on envisager pour de tels systèmes exploiter l'axe "produit" pour la structuration du niveau supervision de la commande. Cette idée s'annonce sans issue pour la phase à traitement continu à cause de la non atomicité du produit. Dans l'exemple 1, la considération du produit "sable - coulée de verre" est minime pour le niveau de supervision qui doit principalement générer des consignes de réglage de la quantité d'énergie à injecter dans le four.

Pour la deuxième classe, le produit est difficilement localisable et identifiable pour faire l'objet d'une commande discrète. Dans les réservoirs de stockage, le liquide prend la forme des parois. Au cours d'un transfert, il est localisé à la fois dans la cuve de départ, dans les tuyaux

intermédiaires et dans la cuve d'arrivée. Toutefois, la considération atomique d'une quantité finie de matière qui subit uniformément chaque transformation dans les unités permet de retrouver les caractères SEDs du produit : produits quantifiables, discernables, localisables et à étapes de transformation identifiables.

Rappelons aussi la possibilité d'assurer un contrôle permanent sur la stabilité de l'état du produit en cours. Le maintien des grandeurs physiques dans des conditions de température et de pression pendant un transfert et un stockage donne au produit un caractère SEC. Ainsi selon le point de vue, on peut amener à privilégier le caractère SEC ou SED. De notre point de vue, il semble plus convenable de maîtriser les deux points de vue.

II.1.5.2 - La notion de Gamme.

Peut-on envisager ici la notion de gamme de fabrication au sens succession d'opérations élémentaires disjointes dans le temps. En prenant l'exemple 1, cette notion est inexistante. Elle peut s'apparenter à la séquence d'opérations du type démarrage, marche et arrêt qui sont plutôt des opérations attribuées à la gestion de modes de marche/arrêt du four qu'à la description fonctionnelle de la fabrication du produit.

Dans un contexte de production flexible (exemple 2), cette notion de gamme au sens SED devient une réalité effective. Elle s'appuie à la fois sur l'existence et, sur les critères d'isolation dans le temps et sur la partie opérative, des processus élémentaires de type SEC. La fabrication d'un produit est décrite fonctionnellement par un certain nombre de processus continus régis par une relation d'ordre.

La distinction conceptuelle entre gamme logique et gamme opératoire prend aussi toute sa raison d'être. En effet, un niveau élevé de spécification du produit qui ne tient pas compte des ressources transformationnelles ni des contraintes structurelles de la partie opérative répond aux besoins des ingénieurs du génie procédé. Par contre, la transformation en une description fine et exécutable qui tient compte de la structure du procédé et de l'état réel des unités opératoires revient au métier d'automaticien de conduite.

II.1.5.3 - La notion de ressources et lieux physiques élémentaires.

La définition SED d'une ressource comme étant un support physique d'exécution des opérations élémentaires asynchrones nécessite des nouvelles considérations pour être envisagé dans le contexte des SECDs. Les unités telles que les réacteurs, réservoirs isolent physiquement

la portée des processus de transformation, de stockage du reste de la partie opérative. Et dans ce sens, ils constituent des lieux élémentaires qui localisent physiquement le produit et les processus de traitement.

Cependant pour un processus de transfert ou une transformation nécessitant une alimentation progressive (mode fedbatch), le support physique d'exécution du processus associe un certain nombre d'entités physiques (exemple : réservoirs amont, tuyaux de canalisation, vannes, pompes et réacteur aval).

Analysons les caractéristiques de ce nouveau type de ressource. Tout d'abord, la macro-ressource représentée par cette association d'entités physiques est d'une durée limitée au temps d'exécution du processus. Les entités physiques qui la constituent peuvent être choisies dans un sous ensemble d'entités candidates. Ceci pose par conséquent le problème de choix à effectuer a priori en temps réel. Il apparaît ici alors un nouveau type de ressource complexe. Sa complexité réside donc dans le choix des entités physiques qui vont la former et de son aspect reconfigurable (c'est à dire une existence de durée déterminée).

Au cours d'une opération fonctionnant en mode fedbatch, ce type de ressource complexe met en œuvre simultanément un ensemble d'opérations élémentaires. Les deux processus "mélanger" et "alimenter" se déroulent dans un parallélisme simultané et dépendant (synchrone) (fig.2.7). La gestion de ce processus complexe comporte en parallèle :

- un contrôle du stock en A par une surveillance de la grandeur niveau de liquide dans le réservoir A.
- un contrôle de stock en B par une surveillance de la grandeur niveau de liquide dans le réservoir B.
- un contrôle de stock dans le réacteur par une surveillance de la grandeur niveau de liquide A et B.
- une gestion du processus de mélange.

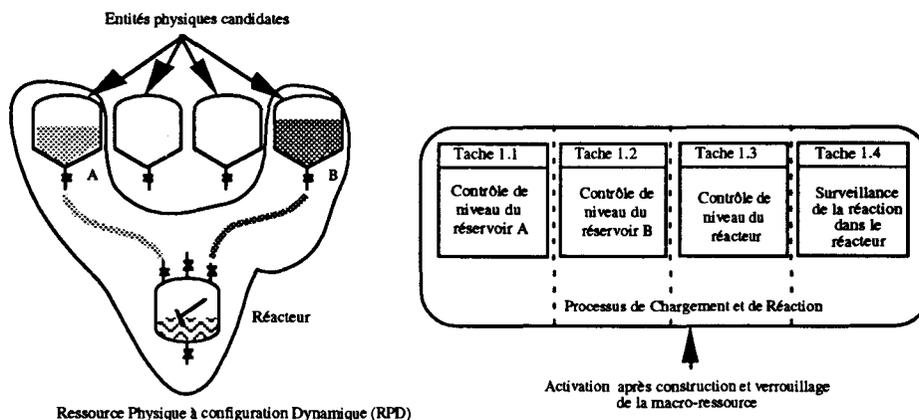


fig.2.7 - Exemple de ressource complexe et parallélisme interne associé

Remarquons que l'entité physique "réacteur" assure deux fonctions simultanées au cours de ce processus complexe : fonction de stockage issue du processus de transfert et une fonction de mélange. Ceci conduit à une double interprétation du lieu physique réacteur dans une analyse fonctionnelle de l'entité.

Ajoutons pour compléter la caractérisation de ce type de ressource le besoin de connaître l'état de chaque entité physique constitutive à la fin de chaque association. En effet, cet état final peut contribuer à la sélection ou non de chaque entité pour constituer une nouvelle ressource complexe. Son évaluation peut amener à décider de mettre en œuvre des opérations annexes pour ramener l'état d'une entité dans des conditions physiques souhaitées : exemple opérations de nettoyage, séchage, de stérilisation pour respecter des conditions d'hygiène stricte ou par mesure de sécurité afin d'éviter toute réaction imprévisible.

II.1.5.4 - Fabrication et Processus continus-discrets.

La fabrication continue-discrète se caractérise dans une transformation de flux continu entrant pour donner un flux discontinu d'objets solides identifiables (ou bien dans le cas de figure inverse). Ce type de fabrication utilise les deux sémantiques de la notion de processus pour élaborer le produit :

- en phase de traitement continu, le processus, au sens attribué au SEC (tâches synchrones et dépendants), est déployé pour modifier les paramètres physico-chimiques caractéristiques de l'état du produit.
- en phase de traitement manufacturier, le processus au sens SED s'identifie à la séquence d'opérations élémentaires manufacturières asynchrones et isolables sur des ressources physiques.

Processus continus-discrets élémentaires

Les processus de transformation pendant la phase continue peuvent être en interaction étroite avec l'énergie et, de ce fait, il est de nature continue par essence. C'est le cas du processus de transformation du sable en coulée de verre.

Dans le cas d'une production flexible, il est possible d'identifier un ensemble de processus à caractère continu évoluant sur un horizon de temps fini. Leur exécution se réalise sur un support physique que l'on peut "isoler" (ressource simple ou ressource à configuration dynamique). La propriété de "**temps fini d'exécution sur des ressources indépendantes**" nous amène à considérer les processus unitaires suivantes :

- **processus de transport.** Il consiste à transférer une quantité de matière d'une entité de stockage vers une autre. Ce déplacement nécessite un maintien des paramètres physiques dans des conditions de stabilité de l'état de départ (invariance de l'état continu). Il se distingue aussi par la mise en œuvre d'une association de ressources physiques simples.

- **processus de transformation.** Il effectue l'ajout de valeur sur la matière. Il peut être unaire : c'est le cas d'une opération de fermentation.
Il peut aussi être du type n-aire analogue aux opérations d'assemblage en "manufacturier" : c'est le cas d'une opération de mélange de deux quantités de matières pour avoir une nouvelle matière de composition différente.
Il peut ressembler à une opération de désassemblage dans le cas d'une séparation comme la distillation ou l'électrodialyse de liquide primaire pour obtenir des produits dérivés.

- **processus de stockage** dont le rôle principal est de maintenir l'état physique initial de la matière dans une unité en attendant la possibilité du processus suivant.

- **processus d'analyse de qualité.** Il procède à l'acquisition des informations qualitatives sur les propriétés physico-chimiques de la matière pour juger sa conformité aux conditions imposées. Il peut s'effectuer en direct aux moyens des analyseurs de compositions ou en différé par le service de laboratoire d'analyse sur prélèvement d'échantillons.

La possibilité d'une supervision au sens SED pour la gestion de ces processus n'est envisageable que par respect de la condition suivante : la mise en œuvre de ces processus élémentaires se succède sur états stables de la matière à la suite des événements tels que :

- fin de transfert conduisant à un état stable de la matière en un lieu physique.
- fin de transformation amenant à un état stable de la matière en un lieu physique.
- fin de stockage avec un état stable du produit.

Ces hypothèses ainsi que celle de l'atomicité des processus unitaires cités ci-dessus sur une ressource permettent de considérer que la supervision des gammes de fabrication est de type SED. Ainsi les méthodologies développées dans ce cadre peuvent être réutilisées pour concevoir le niveau coordination/supervision de la commande. Une classe des SECDs est identifiée par ces conditions. Dans cette classe, les processus élémentaires de nature continue sont totalement assujettis à une supervision de gammes et de ressources (fig.2.8) La propriété de "début/fin"

des processus élémentaires est fondamentale pour donner au niveau de supervision un caractère SED.

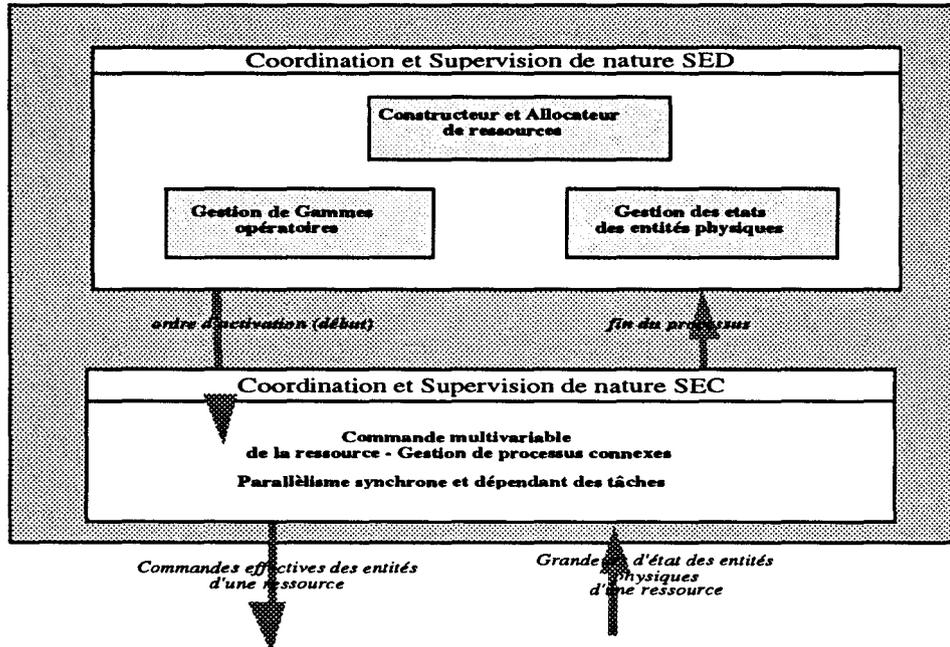


fig.2.8 - Une classe de systèmes SECDs identifiée par la hiérarchisation du niveau coordination/supervision de la commande.

II.1.5.5 - Contraintes entre phase SED et phase SEC.

Il peut apparaître un besoin d'interface pour un SECD au passage d'une production continue à une production manufacturière (et respectivement dans le cas inverse). Le processus de discrétisation de la matière (et respectivement le processus de passage en traitement continu) peut engendrer une contrainte inter-phase souvent pour des raisons technologiques, d'instabilité de la matière, ou de mode de production (fabrication à flux tiré ou à flux poussé).

Pour illustrer cette situation, reprenons l'exemple n°1. La coulée de verre vient alimenter une série de moules qui vont produire des objets discrets (des bouteilles). Pour éviter un risque d'encrassement et garantir un écoulement continu de la coulée, il faut assurer à tout instant une alimentation des moules. L'importance de maintenir les propriétés physiques dans une plage de valeurs bien définies impose une dépendance de disponibilité de la partie SED en aval vis à vis de la partie de type SEC en amont. La supervision des deux parties du procédé se trouve par conséquent fortement couplée par un fonctionnement à flux poussé. En effet, la production de produits manufacturés de la partie SED est tributaire du maintien ou non de l'état de la coulée dans une plage valeurs fixées. Une seconde classe de systèmes de production continus-discrets

apparaît par conséquent ici. Pour cette seconde catégorie, il est impossible de faire un découplage ou hiérarchisation entre supervision de type SED et supervision SEC. Une démarche spécifique est alors requise pour concevoir le système de supervision de l'ensemble.

Remarque : nous n'avons traité qu'une seule forme de SECD à savoir la partie SEC se trouvant en amont de la partie SED. Le cas de figure inverse peut se traiter en raisonnant par symétrie par rapport aux ressources physiques charnières. De même que la dépendance de la partie SED vis à vis de la partie SEC peut également se trouver dans le cas de fabrication à flux tiré.

II.1.6 - CONCLUSION

Nous avons tenté de dégager les caractéristiques significatives (fig.2.10) de ce que nous appelons systèmes de production à états continus discrets dans cette partie du rapport. Cette analyse d'identification est basée sur la gestion des processus de nature différente du niveau coordination/supervision où deux formes de parallélisme coexistent dans des relations plus ou moins couplées selon le type de fabrication (à forte interaction avec l'énergie ou non).

Il est cependant possible de décomposer un système de production en entités indépendantes qui sont les lieux physiques d'exécution des processus atomiques continus. La coordination de ces entités traitées comme des boîtes noires est alors du type SED. La supervision de type SED est donc entièrement maître de la supervision de type SEC. De nombreuses applications industrielles s'identifient dans cette catégorie de SECDs dont font principalement partie les systèmes de production à traitement par lots.

La possibilité d'une hiérarchisation du niveau coordination/supervision permet d'appliquer les approches développées pour les SEDs. La transposition d'un tel savoir-faire pour les systèmes à états continus discrets nécessite cependant quelques considérations particulières comme la notion de Ressource Physique à configuration Dynamique et leur construction, leur gestion adaptée à la nature du produit, qui sont essentielles surtout pour une fabrication flexible.

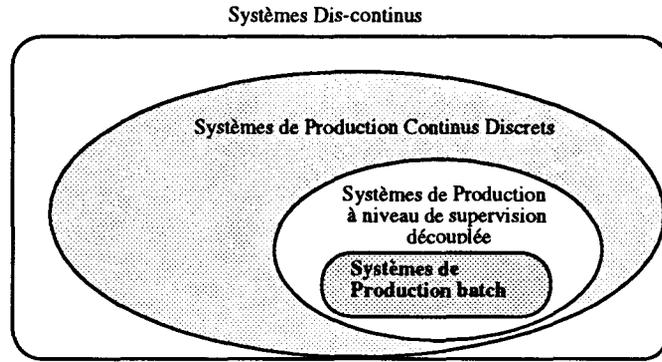


fig.2.9 - Proposition de classification des systèmes de production à états continus discrets.

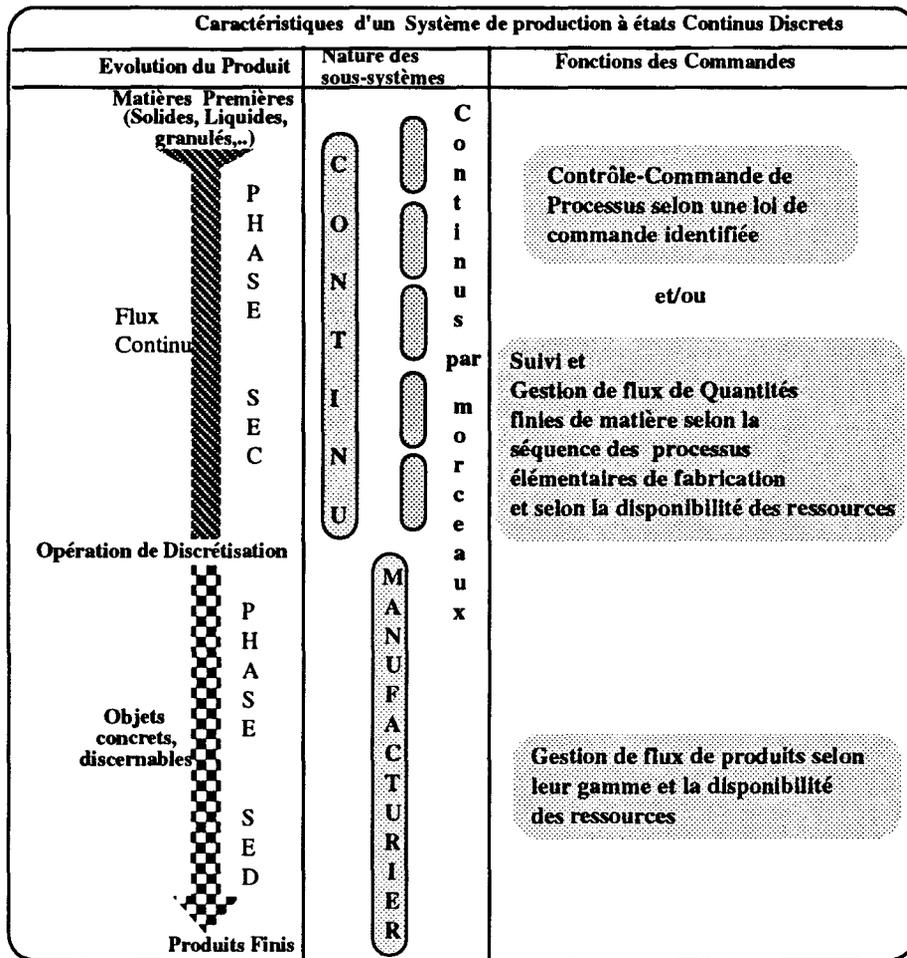


fig.2.10 - Une figure morphologique d'un système de production à états continus discrets vue au niveau coordination/supervision.

II.2 - LES SYSTEMES DE PRODUCTION BATCH ET IDENTIFICATION DE LEUR COMMANDE

II.2.1 - PRESENTATION.

Le besoin impératif de diversifier les produits, afin de suivre les fluctuations du marché, a vu naître un intérêt grandissant pour les systèmes de production ayant la capacité de satisfaire une demande de fabrication des produits spécifiques, souvent à forte valeur ajoutée et de petites quantités dans des délais restreints.

L'automatisation des systèmes batchs a conduit pour les mêmes raisons les praticiens de ce secteur d'activités, à adopter un canevas de référence pour toute démarche de conception de la partie commande [PARK90]. Les premiers travaux notables dans ce sens ont été réalisés au laboratoire de l'université de PURDUE¹ et, ont abouti à une proposition de normalisation des termes utilisés. (Un résumé peut être trouvé dans [BRIST85] et en annexe).

En 1986, des suggestions faites par un groupe de praticiens² de la vallée du Rhin sur la modularité des systèmes de production batch ont été largement reprises et exploitées par le milieu industriel afin de développer des logiciels de conduite destinés aux systèmes flexibles de production tels que [FLEXI91], [ABC92], [TDC92].

Autour de la thématique "systèmes batchs", s'est récemment constituée une communauté de travail ISA-SP88³ qui se propose de définir des standards de modèles fonctionnels, de hiérarchisation et de terminologies spécifiques aux systèmes batchs et à leur commande.

Les systèmes batchs peuvent être définis comme étant des systèmes de production qui **traitent des produits à l'état fluide par quantités finies appelées "lots"**. Le traitement par lots de matières fluides s'effectue de façon discontinue par application de séquences de processus élémentaires de nature continue et logique. La propriété "début/fin" des processus mis en œuvre pendant un cycle de fabrication distingue les systèmes batchs des SECs et, les classe comme étant un sous-ensemble des systèmes séquentiels [ROSE87].

Les systèmes batchs se particularisent par l'élaboration de chaque produit suivant un mode opératoire dont la description complète constitue la **recette de fabrication**. Une recette comprend principalement une **formule** et une **procédure**. Les procédures sont subdivisées en

¹ Lafayette Ouest, Inde

² NAMUR : Norm Ausschuss für Mess und Regelungstechnik

³ Instrument Soc. of America - Standards and Practices Committees

phases comportant des processus élémentaires. L'exécution des phases est régie par un ordre de précedence susceptible de changer en cours de fabrication en fonction de l'état de la partie opérative et en fonction de l'état du produit en cours de préparation. La recette comporte aussi une liste de paramètres définissant chaque lot et les conditions de réalisation des opérations élémentaires qui, également, peuvent être modifiées en cours d'exécution.

II.2.2 - DIFFÉRENTES ARCHITECTURES

La disposition des équipements dans les installations batchs reflète souvent le mode de production pratiqué. Dans les ateliers de type flowshop ou multi-produit, les unités sont organisées en série pour favoriser la fabrication des produits d'une même famille qui, une fois commencée, ne peut plus être interrompue. Des ateliers jobshop ou multi-usage constitués de multiples unités identiques, disposées en parallèle, autorisent la flexibilité des lieux, des dates de début de préparation de produits relativement différents.

Parmi l'ensemble des systèmes batchs, on peut distinguer trois catégories [AKA89] :

1 - Procédé batch à dominance "transformation sur unités physiques".

Cette classe privilégie les phases d'opérations à réaliser sur chaque unité. La description de la recette est basée sur les transformations au sein des unités. Une transformation unitaire peut comporter des opérations complexes. Les lignes de transfert entre unités sont très simples. Elles définissent, par conséquent, des lignes de fabrication figées pendant une campagne. Les modes de production sont du type [GUID85] :

- **mono-produit / mono-flux simple** (fig.2.15a). Un seul lot est élaboré à tout instant. La ligne de production forme une seule ressource indivisible. La recette ne comporte, dans ce cas, que des informations quantitatives sur chaque lot à préparer.
- **mono-produit / mono-flux en série** (fig.2.15b). Une ligne de production comporte au moins deux unités de transformation. L'enchaînement de la préparation de deux lots de même produit est possible. Ceci permet d'optimiser le temps d'occupation des appareils mais, par contre, nécessite une vue éclatée de la ligne de fabrication pour la gestion simultanée de deux phases différentes.
- **multi-produits / mono-flux** (fig.2.15c). La possibilité de paramétrer les opérations de transformation dans les unités et l'utilisation des unités de stockage de matières premières différentes permettent de fabriquer des nuances de produits d'une

même famille. Le cheminement de chaque lot reste le même. Le traitement consécutif de deux lots de recette différente peut être pratiqué dans ce type d'installation. La cohabitation de la préparation de deux produits différents sur une même ligne de fabrication requiert une gestion physique (localisation des lots et reconstitution périodique de leurs états réels) et logique (gestion de l'avancement de chaque lot dans leur recette suivant leur procédure) du produit.

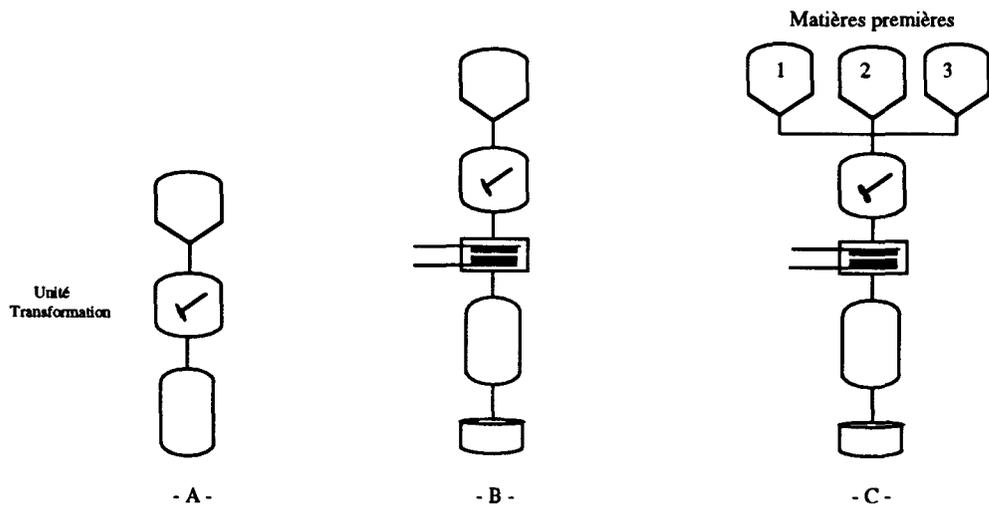


fig.2.15 - Procédés batchs orientés transformation.

2 - Procédé batch à dominance "transfert de lots".

Ce type de procédé est souvent destiné à transférer sur une grande distance des carburants fluides (pétrole). Les opérations dans chaque unité physique sont simples du type mélange par exemple. Par contre, les éléments de transfert ont une structure complexe (réseau de canalisation) (fig.2.15d). Les principales difficultés rencontrées reposent sur les points suivants :

- trouver le chemin optimal de passage entre deux unités parmi un nombre important de combinaisons.
- un grand nombre de séquences d'interverrouillage pour isoler ou libérer le chemin trouvé.
- la surveillance de l'évolution des phénomènes "physiques" sur une grande distance, et réparties dans les unités et les conduits d'amenée.

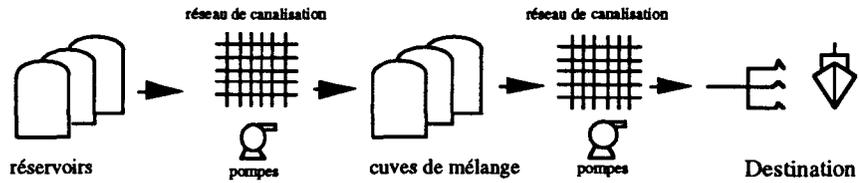


fig.2.15d - Procédé batch orienté transfert.

3 - Procédé batch à fonctions mixtes (fig.2.15e).

Cette installation combine les caractéristiques des deux procédés cités précédemment pour donner un atelier flexible multi-produits / multi-flux. La disposition en parallèle d'un multiple d'unités de transformation interconnectées aux unités de stockage à travers un réseau de tuyauterie rend possible la fabrication simultanée et parallèle d'un certain nombre de produits de recettes différentes. Le cheminement emprunté par chaque lot de produit est variable. Ceci nécessite fondamentalement une gestion séparée des lots et des ressources physiques de l'installation.

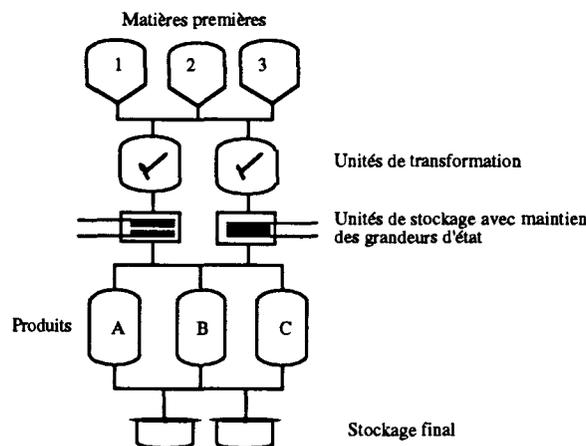


fig.2.15e - Installation flexible.

Le traitement par lots de produits à états continus couvre un large secteur d'activités industrielles. Une grande majorité des industries agro-alimentaires, pharmaceutiques, chimiques, sidérurgiques en sont quelques exemples significatifs qui permettent de situer la position des systèmes batchs dans la production moderne.

II.2.3 - COMMANDES DES SYSTEMES BATCHS OU COMMANDES BATCHS

Les commandes des systèmes batchs se distinguent particulièrement par l'association des fonctions de nature continue et de nature logique (combinatoire et séquentielle). Les interactions entre ces automatismes sont permanentes pendant les phases de transformation.

Cependant, la dépendance des automatismes continus vis à vis de la recette (paramètres de configuration et de réglage) et de la procédure (la séquence de phases) permet de structurer les commandes batchs en niveaux hiérarchiques découplés .

Des particularités comme les fonctions de sécurité, d'interface opérateur, de gestion temps réel de données font partie intégrante de l'ensemble des fonctions que doit assumer la partie commande batch.

II.2.3.1 - Caractéristiques dis-continues des commandes batchs.

II.2.3.1.1 - Fonctions de commande continues : maîtrise des trajectoires des variables analogiques au sein des unités.

Les commandes des variables continues sont déployées par le contrôle des phases de transformation qui ont lieu au sein des unités. Leurs objectifs peuvent être simples comme le **maintien** de consignes sur les variables du modèle du système. Dans ce cas, les principales fonctions rencontrées [PROC91] sont :

- régulation de température, contrôle de chauffage et de refroidissement d'un réacteur par injection de sources d'énergie dans le revêtement enveloppant,
- régulation de niveau de liquide,
- régulation de pression,
- régulation de débit.

Pour les opérations d'analyse qualitative d'un lot, la commande doit procéder à l'évaluation de l'état continu qui n'est pas souvent obtenu de manière directe. A défaut d'analyseurs spécifiques (par exemple analyseur de couleur, de moisissure dans les procédés biotechniques), une fonction de reconstitution de l'état physique du produit en cours de transformation est nécessaire. Ceci fait appel à des calculs plus moins complexes à partir des variables mesurables.

L'élaboration des trajectoires des états continus pour la surveillance des processus complexes telles que transfert de masse au cours d'une fermentation ou la cinétique de réaction chimique pose des problèmes de **non-linéarité** et de **non existence de point de fonctionnement en régime permanent** . Illustrons ces propos en prenant l'exemple d'un réacteur discontinu [JALL90] (fig. 2.16) dans lequel un produit C est fabriqué à partir de deux réactifs A et B selon la réaction $A+B \rightarrow C$.

A,B, C	Symboles des réactifs
C _i	Concentration en espèce i
C _p	Capacité calorifique à pression constante
E	Energie d'activation
ΔH	Enthalpie de réaction
k	constante de vitesse
k ₀	Facteur préexponentiel
q _{ve}	débit volumétrique d'alimentation
Q̇	Puissance thermique
R	constante universelle des gaz parfaits
T	Température
V	Volume de la phase réactionnelle
t	temps
r _v	Vitesse spécifique de la réaction
ρ	Masse volumique

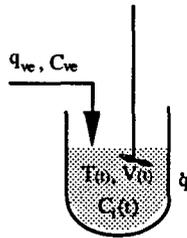


fig.2.16 - Modèle simplifié d'un réacteur discontinu.

Moyennant des hypothèses simplificatrices : pression constante, propriétés thermodynamiques indépendantes de la température et de la composition, milieu réactionnel homogène (agitation parfaite), on peut déduire de l'application des principes de conservation de l'énergie et de la matière, un modèle de connaissance du système. Le modèle de connaissance est établi à partir d'un bilan de matière et d'énergie.

bilan de matière :

- global (en volume) : $\frac{dV}{dt} = q_{ve}$

- par constituant (bilans molaires) :

espèce A : $\frac{dC_A}{dt} = \frac{1}{V(t)} [q_{ve}(C_{Ae} - C_A) - r_v V(t)]$

espèce B : $\frac{dC_B}{dt} = \frac{1}{V(t)} [-q_{ve} C_B - r_v V(t)]$

espèce C : $\frac{dC_C}{dt} = \frac{1}{V(t)} [-q_{ve} C_c + r_v V(t)]$

bilan d'énergie : (m) $\frac{dT}{dt} = \frac{1}{\rho C_p V(t)} [-q_{ve} \rho C_p [T_e - T] + r_v V(t) [-\Delta H] + Q̇]$

r_v permet de connaître les débits de production ou de consommation des espèces réagissantes. C'est une fonction non linéaire des concentrations et de la température, qui est de la forme :

$$r_v = k \prod (C_i)^{\alpha_i}$$

où k , constante de vitesse, est donnée par la relation d'Arrhénius :

$$k = k_0 e^{-E/RT}$$

\dot{Q} représente la puissance thermique échangée entre le milieu réactionnel et le système de chauffage-refroidissement du réacteur. Et ΔH est la chaleur de réaction.

Le modèle (m) est non linéaire pour deux raisons, d'une part à cause de la dépendance de r_v vis-à-vis des concentrations et de la température, et d'autre part à cause de la variation continue du volume V du fait du rajout de réactif A selon le débit q_{ve} . D'autres paramètres auraient pu introduire des non-linéarités si on n'avait pas supposé constantes les propriétés thermodynamiques du fluide.

Ces difficultés d'analyse et de synthèse de modèle reflètent les problèmes de conception des automatismes continus rencontrés dans les systèmes batchs. Il est à remarquer cependant qu'un certain nombre de notions [ROSE87], [PROC91] distingue les commandes continues identifiées dans les systèmes batchs des commandes purement continues. Les automatismes continus rencontrés dans les systèmes batchs sont fortement localisés dans la commande des unités et des ressources. Les processus continus comme les opérations de transformation ou de transfert d'un lot de fluide restent localisés au niveau **ressource** (simple ou complexe) d'une ligne de fabrication et au niveau **temps opératoire**. Ils se succèdent sur états stables des lots, à la suite d'une occurrence d'événement (ordre de la partie commande, de l'opérateur de conduite).

De ce fait, l'activation des différents processus continus dépend entièrement de la recette. La recette modifie alors les consignes de réglage de la commande des variables physiques selon les phases de transformation du produit. A l'opposé des commandes purement continues qui règlent les mêmes grandeurs d'état sur une longue période avec les mêmes consignes, les commandes continues dans les systèmes batchs sont paramétrées par la recette.

II.2.3.1.2 - Fonctions de commande événementielles.

Les commandes batchs de nature événementielle peuvent être identifiées dans deux classes :

a - Au niveau unité (fig.2.18) : une classe comprenant les commandes tout ou rien, les actions élémentaires, la gestion des opérations élémentaires d'une phase d'un lot.

La première fonction des commandes logiques observées au niveau des unités ou des éléments de transfert, est chargée de commander des variables booléennes comme :

- le positionnement des dispositifs tout ou rien : exemple vannes à deux états (Ouvert et Fermé).
- la temporisation des opérations élémentaires,
- la mise en marche ou à l'arrêt des actionneurs comme les pompes ou les moteurs des agitateurs,
- l'activation ou désactivation des régulateurs.

Cette classe de commandes est destinée aux objets actifs les plus élémentaires de la partie opérative. Leurs ordres sont destinés à des états discrets qui sont bien identifiés et assignés à des symboles de référence.

Un sous-ensemble d'objets actifs est associé pour être mis en œuvre par les **actions élémentaires** pour accomplir une fonction atomique. Cette fonction contribue généralement de manière significative à l'ajout de valeur au produit. Cette action s'adresse à des objets physiques évolués du procédé pour accomplir un objectif élémentaire de transformation ou de transfert d'un lot.

Cette association d'objets peut être déterminée par les liens structuro-fonctionnels qui sont mis en évidence lors d'une description détaillée de la partie opérative. Dans ce cas, des actions élémentaires génériques peuvent être utilisées pour décrire leur comportement. A l'exemple de la description de tronçon (fig.2.17), des actions élémentaires comme "*fermer tronçon*", "*ouvrir tronçon*" font référence à l'ensemble (débitmètre F1-vanne V1-pompe P1-vanne V2-portion de tuyau) pour le conduire dans un état contribuant au transfert d'un lot.

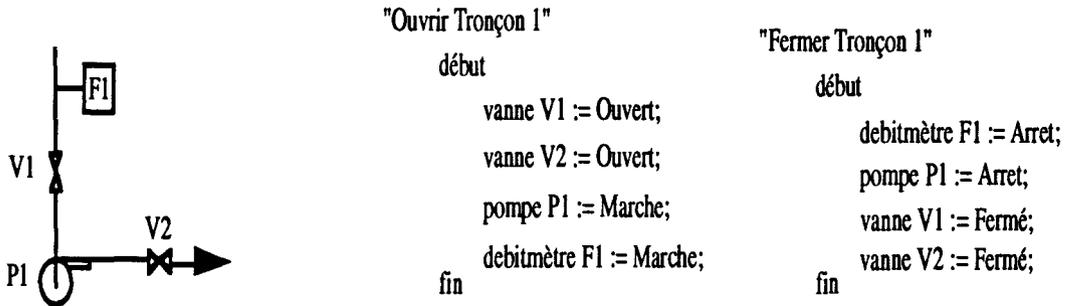


fig.2.17 - Objet évolué et actions élémentaires associées.

Les actions élémentaires peuvent être mises en évidence à l'issue de la décomposition d'une phase de transformation d'un lot en commandes fines. Elles sont définies dans ce cas comme des primitives transformationnelles de description d'une phase. Ainsi les actions élémentaires comme "*mesurer la température*" d'un lot, "*suivre un profil*" pour asservir l'évolution d'une grandeur analogique sont des exemples de telles primitives. Leur syntaxe complète nécessite l'exploitation des paramètres définies dans la recette.

Ces actions élémentaires sont regroupées selon leur objectif en séquence de **phases**. Une phase représente alors une étape de transformation qui est délimitée par deux états stables d'un lot. Le début d'une phase est synchronisé par l'occurrence d'ordres d'activation. Ainsi dans l'exemple suivant, les phases comme "*charger un lot*", "*mélanger avec un additif*", "*vider un lot*" se succèdent sur états stables bien définis du produit.

Des fonctions de **gestion de mode de marche locale** sont aussi assimilées à des fonctions logiques au niveau des unités. En effet, la transition sur des états discrets de fonctionnement comme démarrage, arrêt, en marche, défaillance, en maintenance sont conditionnées par des événements locaux ou par des ordres provenant du niveau de coordination ou de l'opérateur de conduite.

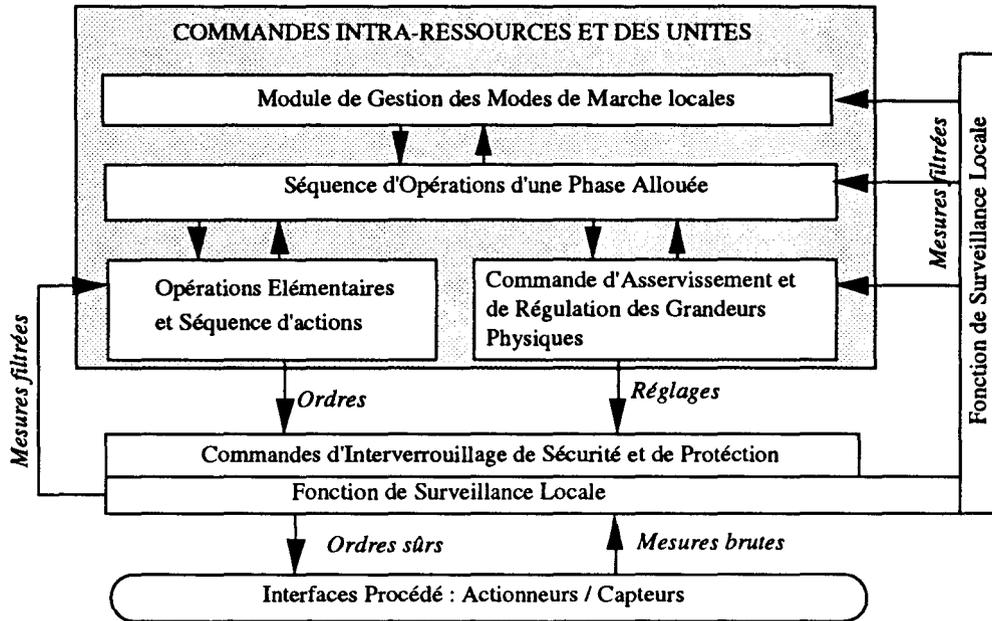


fig.2.18 - Principales fonctions des commandes intra-ressources et des unités.

b - Au niveau coordination et supervision : une classe comprenant la gestion de procédures des lots en cours.

Les commandes de ce niveau ont un premier rôle de suivi de préparation d'un lot suivant la procédure de la recette pendant son cycle de fabrication. Cette fonction est analogue à celle assumée par ce même niveau pour les gammes de produits manufacturiers fabriqués dans un atelier flexible. Cette gestion de recette est basée essentiellement sur la gestion de séquence de phases et de la gestion de la disponibilité des ressources de la partie opérative. L'affectation d'une phase de transformation à une ressource d'exécution détermine l'ordre d'activation du début de l'opération.

La génération d'un tel ordre d'activation peut demander la résolution de certaines situations conflictuelles. Une première forme de conflit rencontrée dans l'automatisation des systèmes batchs est liée aux caractéristiques inhérentes du produit. En effet, la manipulation de matière fluide demande implicitement des précautions qui ne sont pas toujours bien explicitées dans la recette. Un deuxième type de conflit apparaît également dans la conduite d'une installation multi-flux et multi-produit qui requiert une fonction complexe de gestion des conflits pour résoudre les problèmes posés par la concurrence et le routage de différents lots. Illustrons ces différentes formes de conflit par des exemples.

b1 - Conflits liés aux caractéristiques du produit : incompatibilités.**Premier exemple :**

Lors de la préparation d'un lot, il convient d'éviter l'utilisation d'ingrédients dont les propriétés physiques sont incompatibles. Leur manipulation au sein d'un même réseau de canalisation et d'unités d'utilités communes demande des services supplémentaires dont la prise de décision appartient à un niveau élevé de la commande. A l'exemple d'un dispositif de pesage, supposons qu'il vient d'être utilisé par un produit A incompatible avec un produit B. Le produit B peut solliciter à son tour le même appareil juste après le pesage d'une quantité de produit A. Le niveau de coordination doit détecter cette situation conflictuelle et décider le nettoyage de l'unité avant d'autoriser l'opération de pesage. Selon le degré d'automatisation de l'installation, le nettoyage peut être réalisé automatiquement¹ ou manuellement par passage en mode manuel du système de conduite de l'unité de pesage.

Deuxième exemple.

L'hypothèse de description de la procédure d'une recette considère que les ressources et la ligne de fabrication sont initialement dans un état précis (exemple : l'état de repos). Cependant dans un traitement chaîné de deux produits (A suivi de B), l'état des ressources laissé par la fabrication de A peut ne pas correspondre à l'état que demande les conditions de début de fabrication du produit B. Cette situation contradictoire doit être résolue par le niveau de coordination qui doit ramener d'un état à priori indéterminé à un état recommandé les ressources d'une ligne de fabrication. Ceci peut amener à exécuter des opérations supplémentaires de configuration ou à faire intervenir un opérateur.

b2 - Complexités posées par la flexibilité de fabrication.**Exemple 1 :**

Considérons le cas fréquemment rencontré dans une installation flexible illustré par fig.2.19. L'alimentation en additif des trois unités de traitement (UT1, UT2, UT3) se fait à partir d'un seul et même transmetteur de débit (FT ressource critique) pour des raisons économiques (minimisation du coût de l'installation). Lors d'un fonctionnement asynchrone des trois unités de transformation, plus de deux unités peuvent demander à un instant donné à être chargées (concurrence) en utilisant le seul transmetteur de débit FT. Or la structure de l'installation ne permet d'alimenter les trois UT que de manière séquentielle.

¹ cas des installations CIP Clear In Place

Le partage de telle ressource critique selon des critères d'optimisation de fonctionnement nécessite un arbitrage au niveau de coordination.

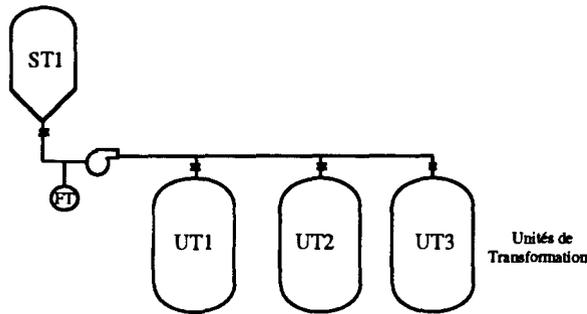


fig.2.19 - Transmetteur partagé par trois unités de transformation.

Exemple 2.

Le transfert de lots d'une unité de transformation à une autre pose un problème d'acheminement à travers une installation flexible. Cette opération se définit tout d'abord par le mouvement d'un lot qui vient de subir un traitement au sein de l'unité de départ et qu'il faut router vers un autre lieu soit de traitement ou de stockage. Elle est à distinguer du transfert de matières premières vers un lieu de réaction pour former un lot [ROSE87].

La figure (fig.2.20) présente un exemple complexe de routage dont la gestion doit être analysée au niveau de coordination de la commande. Chacun des réacteurs (UT1, UT2, UT3) peut alimenter n'importe quelle unité de stockage (US1, US2, US3). Trois lots de recette différente peuvent être préparés simultanément pour une exploitation maximale de l'installation selon les trois lignes verticales de fabrication (UT1->US1, UT2->US2, UT3->US3). Or pour une raison d'indisponibilité d'une unité ou de demande urgente sur un produit, on peut être amené à utiliser une unité de stockage (par exemple US2, US3) à la place d'une autre (US1) pour stocker un lot initialement non prévu.

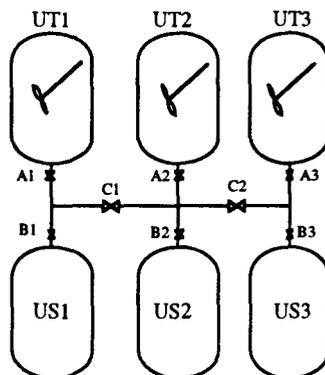


fig.2.20 - Problème de routage de lots

Dans le cas normal, les vannes horizontales (C1, C2) restent fermées et seules les vannes de vidange des réacteurs (A1, A2, A3) et les vannes d'entrée des unités de stockage (B1, B2, B3) sont à ouvrir. Lors d'un transfert croisé, l'une ou les deux vannes C1, C2 doivent être ouvertes, en plus de celles des unités qui vont communiquer. Ce transfert croisé autorise ou inhibe la possibilité de transfert entre d'autres unités. Nous allons déduire du tableau suivant les transferts possibles simultanément en fonction des positions des vannes :

ID	Transfert de vers		VANNES							
			A1	A2	A3	B1	B2	B3	C1	C2
M11	UT1	US1	O	X	X	O	X	X	F	X
M22	UT2	US2	X	O	X	X	O	X	F	F
M33	UT3	US3	X	X	O	X	X	O	X	F
M12	UT1	US2	O	F	X	F	O	X	O	F
M13	UT1	US3	O	F	F	F	F	O	O	O
M21	UT2	US1	F	O	X	O	F	X	O	F
M23	UT2	US3	X	O	F	X	F	O	F	O
M32	UT3	US2	X	F	O	X	O	F	F	O
M31	UT3	US1	F	F	O	O	F	F	O	O

Tableau des positions des vannes (O : ouverte, F : fermée, X : indifférente) pour chaque type de transfert.

L'interprétation de ce tableau conduit à un bilan de transfert compatibles ou simultanément possibles :

Transfert triple : M11 - M22 - M33.

Transferts doubles : M11 - M22; M33 - M22; M11 - M33; M11 - M23 ;
M11 - M32 ; M12 - M33 ; M21 - M33.

Transferts simples : M13 ; M31.

Ces quelques exemples illustrent les problèmes de synchronisation et de partage de ressources que le niveau de coordination doit gérer lors d'une préparation asynchrone de lots différents dans une installation flexible. Les décisions doivent être nécessairement prises en temps réel car des contraintes liées aux propriétés physiques de certains produits n'accepteront

pas les attentes occasionnées par un retard de réaction de la part du système de conduite ou de la part de l'opérateur.

Des techniques de résolution de tels problèmes (premier demandeur premier satisfait, par ordre de priorité, etc.) peuvent être envisagés, cependant elles ne tiennent pas compte de certaines caractéristiques inhérentes aux produits continus-discrets. En effet, la solution par ordre d'arrivée ne considère pas l'évolution des grandeurs d'état des produits en attente pendant laquelle ils peuvent faire l'objet d'une dégradation irrémédiable. D'un autre côté, l'attribution d'un ordre de priorité nécessite une fonction algorithmique complexe qui doit évaluer un nombre considérable de paramètres. De plus la nature de ces paramètres varie aussi d'une recette de produit à une autre, d'une phase à une autre pour un même lot. Dans certains cas, des paramètres de nature aléatoire (par exemple des phénomènes rémanents mal connus dans les réacteurs : augmentation du taux hygrométrique,) sont à l'origine de dégradations rapides des produits. L'élaboration d'un ordre de priorité devient alors dans ces cas très difficile.

II.2.3.2 - Besoins spécifiques des commandes batchs.

La manipulation des produits de nature fluide (gaz, liquide, poudre) demande des fonctions supplémentaires que doit assurer la partie commande en plus de la procédure normale de préparation. A cause de leurs propriétés physico-chimiques instables, les produits en cours sont soumis en permanence à des phénomènes dégradants :

- transformations intempestives sur les lieux de stockage ou de transfert.
- réactions incontrôlées dues par exemple à des circonstances hasardeuses bien connues dans les processus chimiques : HAZOP* [OZOG85], [GIBS91] .
- risques dangereux pouvant causer des dégradations pour les moyens de production et des risques pour le personnel (explosibilité, toxicité, inflammabilité).

D'autre part, des conditions imposées par des commissions gouvernementales (exemple U.S Drug and Food Administration) peuvent exister et doivent être respectées particulièrement dans la fabrication de produits pharmaceutiques et alimentaires.

La prise en compte de ces nouvelles contraintes qui font partie intégrante de l'environnement de la production batch exprime des caractéristiques tout à fait spécifiques aux commandes batchs.

* HAZOP : HAZard and OPerability



- **besoins de fonctions de sécurité et de surveillance.**

a - Commandes d'interblocage ou d'interverrouillage.

Leur rôle principal est d'inhiber l'exécution d'une commande dans des conditions critiques qui vont conduire inévitablement à des situations dangereuses. Ces commandes constituent le dernier recours permettant d'empêcher l'exécution d'une commande erronée. Elles jouent dans ce sens le rôle de filtre de sécurité assurant la bonne mise en œuvre des actionneurs.

Il faut noter cependant que leur fonction ne permet pas de prédire ni d'empêcher l'occurrence des dysfonctionnements mais par contre contribue à la réduction du risque d'apparition des défaillances de sécurité.

Différents types de fonctions d'interverrouillage peuvent être mises en œuvre selon la gravité des événements : arrêt automatique, déclenchement automatique d'une procédure d'exception dans le cas simple ou bien utilisation de logique de vote, de temporisation dans les cas plus complexes.

Les qualités demandées à ces commandes [KOHA84] sont :

- la **promptitude**. Implémentées à l'aide d'automatismes logiques combinatoires, leurs actions doivent réagir instantanément.
- l'**indépendance**. Leur conception et implémentation doivent être réalisées séparément du développement de la partie commande.

Les exemples classiques rencontrés dans les systèmes batchs sont :

- activation d'une pompe respectant des conditions de démarrage. Exemple de la figure fig.2.17 : $P1(\text{marche}) = V1 \text{ et } V2 \text{ et } F1$.
- interblocage des vannes de dosage et de vidange qui ne doivent pas être ouvertes simultanément.
- interblocage des vannes d'un tuyau à alimentation multiple. Une seule vanne peut être ouverte à tout moment.

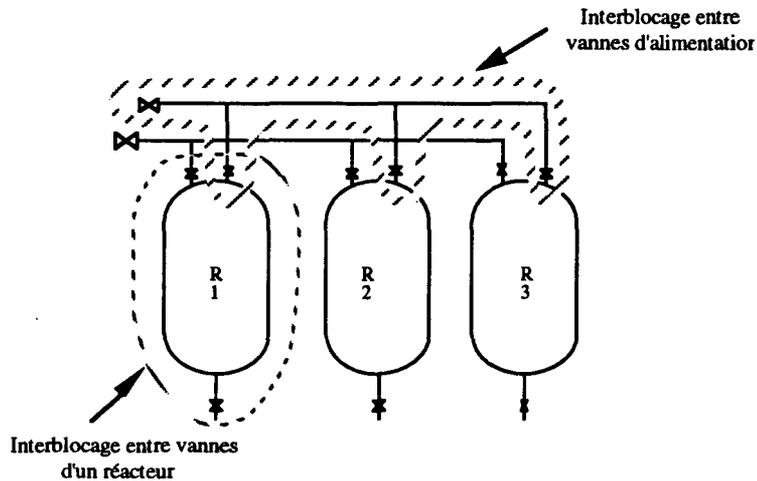


fig.2.21 - Exemples d'interblocage.

b - Les séquences d'exception, d'arrêt et d'arrêt d'urgence.[ROOD89]

Ce groupe de commande de sécurité est conçu pour se substituer à la commande normale de l'installation suite à l'apparition de défaillance matérielle et de déviation inacceptable des paramètres de fonctionnement. Leur objectif est avant tout de ramener l'état courant vers un état de repli jugé sain avant d'appliquer des mesures correctives. Le retour à la conduite normale est possible après l'intervention de l'opérateur (acquiescement des alarmes, forçage des conditions opératoires, vérification sur site, ...) dans le cas de séquence d'exception et d'arrêt. Par contre, un arrêt d'urgence cause généralement la perte du lot pour préserver la sécurité du personnel et du matériel.

c - Conditions dynamiques des alarmes

La gravité des alarmes utilisées dans la surveillance des systèmes batchs varie en fonction des différentes phases. Prenons l'exemple d'une vanne de chauffage-refroidissement d'un réacteur. Au cours de la phase de chauffage pour amorcer la réaction, la défaillance de la vanne est signalée par une alarme de gravité non critique. Par contre, la même défaillance devient très critique pendant une réaction exothermique pendant laquelle la phase de refroidissement doit absolument avoir lieu.

- besoin d'interface intelligente entre opérateur de conduite et procédé

Le besoin d'interface est une nécessité primordiale dans la conduite des systèmes batchs. En effet, la commutation entre mode manuel et automatique est quasi-permanente. Elle résulte de nombreuses sollicitations de l'opérateur (existence d'opérations manuelles dans la recette, prise de décision devant des situations conflictuelles, modification fréquente des phases, acquittement des alarmes, ...) [RIJN89]. De plus, elle traduit la volonté des utilisateurs de pouvoir commander leur processus selon différents modes (automatique, semi-automatique, manuel) pour une meilleure maîtrise de la conduite [SCHL85]. L'interactivité de cette interface doit permettre, dans ce cas, de commander directement le début des phases, les actionneurs et de modifier les valeurs des paramètres des recettes.

La qualité de cette interface est cruciale. Elle doit être capable de fournir des détails sur les états des unités et des lots (phase en cours, valeurs des paramètres, etc.). Ces informations demandent une présentation intelligible et synthétique pour aider l'opérateur à percevoir rapidement les événements pertinents. A l'occasion d'un dysfonctionnement, une assistance de sauvegarde de contexte, de localisation est requise. Elle peut aller jusqu'à proposer des suggestions sur les causes et sur les actions de maintenance à entreprendre.

- besoin de langages particuliers de spécification de la recette [SOTO89].

La recette de préparation est porteuse d'informations fortement impliquées dans l'élaboration de la commande de tous les niveaux de la structure hiérarchisée de la partie commande. Sa description demande alors des langages particuliers qui doivent tenir compte des spécificités de fabrication du produit et du profil des différents intervenants.

Deux types de recette (quatre selon ISA/SP88 [GUID92]) peuvent être distingués [BOW75]. Une première description de niveau élevé utilise un langage de haut niveau. Des primitives de service telles que :

"charger (<@_unité>, <produit>, <dose>)",

"transférer (<@_départ>, <@_destination>, <quantité>)"

et des fonctions de transformation de haut niveau telles que

"polymériser(param1, param2, ...)",

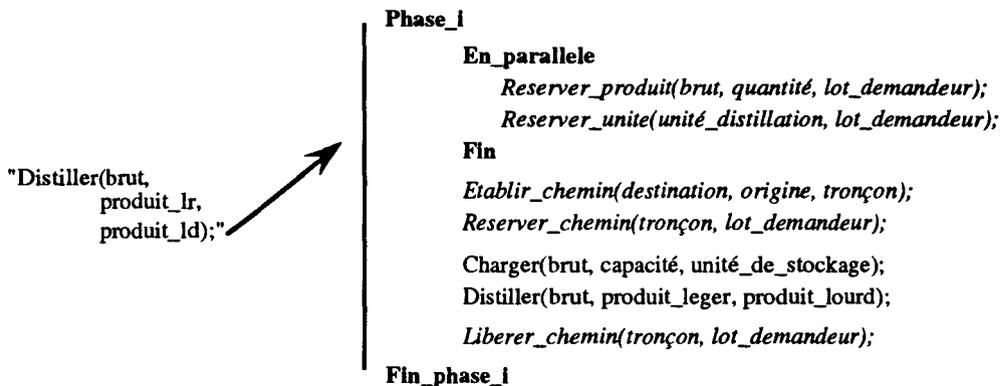
"distiller(param1, param2, ...)",

"mélanger(...)"

en sont une illustration des principaux éléments de spécification.

Une seconde description utilise un langage opératoire traduisant la **recette source** spécifiée précédemment en **recette exécutable** pour le module exécutif des procédures. La

distinction réside dans l'abstraction de la structure de la partie opérative et de la stratégie de mise en œuvre des ressources de fabrication faite par le langage de spécification de recette source. Par contre, une recette exécutable détaille les fonctions de haut niveau en actions élémentaires, intègre les éléments physiques opératoires de la partie opérative et comporte les mécanismes de requêtes, de tests et de réservation de ressources.



Traduction d'une phase source en phase exécutable d'après [SOTO89], [CHLI91].

Cet aspect de la recette est très proche de la considération conceptuelle de la gamme (gamme logique et opératoire) faite dans la méthodologie CASPAIM. Cette caractéristique de la recette permet de conserver l'idée de privilégier l'axe "**produit**" dans une démarche de conception de la commande pour ces systèmes. Cette constatation contribue de manière déterminante à la possibilité de transfert des approches proposées pour les SEDs dans le domaine de la supervision des systèmes à états continus discrets de type batch.

II.2.3.3 - Spécifications des activités de Coordination/Supervision.

La qualité d'un système de coordination et de supervision repose avant tout sur le respect de la date de fin au plus tard de fabrication pour chaque lot en cours. Cette performance résulte principalement des aspects tels que : une meilleure disponibilité des équipements, une répartition équilibrée des charges sur les ressources, une maîtrise du dialogue homme-machine, une meilleure stratégie de pilotage des allocations de ressources aux phases des lots et de la génération de commandes sûres.

Nous proposons de décrire les principales activités contribuant à la réalisation de cette tâche complexe suivant deux flux (fig.2.22) :

- a - un flux descendant de commandes (spécification orientée produit)
- b - un flux ascendant d'informations (spécification orientée surveillance et gestion de mode de marche).

a - flux descendant de commande.

Ce flux illustre la traduction de l'ordre de fabrication d'une campagne émanant du niveau de planification en phases de transformation à réaliser au niveau des unités. Le traitement comporte des activités de :

a1 - Ordonnancement local.

Ce module d'ordonnancement se charge, au niveau coordination/supervision, d'établir un plan de fabrication qui définit la séquence des ordres de lancement en fabrication des lots en respectant les contraintes (dates dues) imposées par la planification à moyen terme. Il répartit alors dans le temps la fabrication d'une campagne de produits en un certain nombre de lots en fonction de la capacité des unités de transformation et de stockage. Le plan de fabrication trouvé doit être une solution :

- **dynamique** car elle doit tenir compte de l'état réel de l'installation, des aléas de la fabrication (pannes des machines, modification par l'opérateur des recettes).
- et **optimale** car elle doit satisfaire des objectifs de réduction de coût telle que minimisation des stocks, la maximisation de la vitesse des actions de transformation et de transfert.

Le processus de calcul doit alors fonctionner de manière réactive, en ce sens que la prise en compte en temps réel des événements de fabrication conduit à un réajustement rétroactif du plan de fabrication. En cas de dépassement grave de la marge du temps alloué, une demande de relaxation des contraintes peut être adressée au niveau supérieur [HAM91].

Deux événements activent généralement le processus de calcul du plan de fabrication : l'arrivée d'un nouveau lot (ordre d'insertion dans le plan de fabrication) et le retrait d'un lot existant mais non lancé (ordre de suppression) du plan de fabrication. L'émission d'un ordre de fabrication qui va marquer le démarrage de préparation provoque la suppression du lot lancé et les informations associées du plan de fabrication.

a2 - Gestion de lots.

Ce module gère le lot lancé en fabrication jusqu'à la fin de sa préparation. Sa fonction consiste essentiellement à créer et à entretenir une fiche descriptive de chaque lot à partir des données initiales de la recette mère et de l'évolution du lot dans son processus de fabrication. Il répond ainsi aux besoins de gérer les données procédé afin de reconstituer l'état des lots et de les rendre accessibles aux autres fonctions du niveau de la supervision.

Ce module peut accomplir aussi un rôle d'amorçage de préparation des lots. Il surveille dans ce cas, les conditions de démarrage de la première phase de chaque procédure (vérification de la disponibilité des unités de stockage et de l'unité de transformation, mode de lancement (automatique ou manuel)).

a3 - Gestion de procédures des lots.

La gestion des procédures de préparation des lots représente le noyau de la fonction de coordination des systèmes automatisés batchs. Son rôle principal est d'assurer le parallélisme d'exécution de différentes phases des lots en cours de préparation sur une même installation. Elle doit résoudre aussi la synchronisation d'accessibilité aux différentes ressources de la partie opérative. Cette tâche complexe qui va conditionner la performance de la fabrication (respect de la date de livraison) résulte de la coopération des principaux modules tels que :

*** module de décisions.**

La résolution des situations conflictuelles exposées au §II.2.4.1.2.b et les indéterminismes liés aux choix de routage des lots (cas des installations flexibles multi-flux et multi-produit ou orientées transfert) nécessite l'intervention d'un niveau hiérarchiquement élevé pour la prise de décisions. Cette fonction de pilotage comporte principalement :

- l'arbitrage des accès aux ressources demandées par des lots concurrents.
- la détection des incompatibilités entre les lots en cours de préparation dans une même installation. Les solutions suivantes peuvent être envisagées :
 - * passage de mode de fonctionnement automatique en manuel pour permettre une intervention humaine.
 - * ajout d'une phase ou lot de nettoyage "lot nettoyeur [BAUD88]" entre chaque lot.
- la recherche de tronçons de liaison pour constituer les ressources complexes sièges d'opérations de transfert.

Ce module de pilotage peut ainsi solliciter une demande d'insertion de phase de nettoyage dans une procédure ou insertion de lot nettoyeur dans le plan de fabrication. Dans ce dernier cas, un rebouclage vers le module d'ordonnancement temps réel entraînera une réactualisation du plan de fabrication.

*** gestion des protocoles d'accès aux ressources.**

L'association effective d'une phase et d'un support physique d'exécution nécessite au préalable la mise en œuvre des primitives de sollicitation de ressources. La mise en œuvre d'une ressource (occupation, libération) demande la modification de leur état discret. Gérer le mode d'accès et de manipulation des ressources est la tâche à assurer par la coordination dans cette activité. Ce module fournit par la même occasion une base d'informations sur l'état réel d'utilisation des ressources, qui sera exploitée par d'autres modules de ce niveau de commande.

La gestion d'accessibilité aux entités physiques peut s'effectuer par l'intermédiaire :

- des primitives de requêtes sur la disponibilité des unités, sur le niveau de stock des unités de stockage.
- des primitives de recherche de chemin de transit.
- des primitives de réservation d'unités et de quantité d'ingrédients.
- des primitives de blocage et de libération de ressources

Le mécanisme de mise en œuvre de ressources par ces primitives peut véhiculer une stratégie d'exploitation de ressources (exploitation en temps masqué, maximisation de taux d'occupation, etc.) et d'optimisation de routage de lot [ROOD89].

*** module exécutif des procédures.**

Il représente la machine virtuelle chargée d'interpréter la séquence de phase pour chaque lot en cours. Il permet le paramétrage du niveau de commande des unités dès qu'une ressource a été allouée à une phase. L'activation d'une phase se réalise alors après envoi vers le niveau commande d'unités de la liste d'actions élémentaires détaillant chaque phase.

Ce module exécutif doit permettre la modification des paramètres de la recette, la réassignation d'une phase non exécutée à une autre ressource et, même le changement de la séquence de phases restante pour un lot en cours de préparation. Cette contrainte d'exécution des recettes batchs demande un exécutif interpréteur de recettes plutôt qu'un exécutif compilé [BOUF92].

a4 - Gestion d'historique et de report de fabrication.

Le système de supervision peut effectuer des traitements en fin de fabrication des lots. Dans la fabrication batch, un rapport détaillé sur le séjour de chaque lot dans les installations est souvent requis. Des formats d'enregistrement prédéterminés peuvent être imposés par des institutions de contrôle, des résultats d'analyse de laboratoire complètent la description explicite de la préparation.

b - flux ascendant d'information.

Les activités de traitement de flux d'informations émanant du procédé ne sont pas spécifiques aux systèmes batchs. Relativement communes aux SAPs modernes, elles sont composées principalement de :

b1 - module de surveillance des lignes de préparation.

L'activité de surveillance de l'installation se rapporte aux trois fonctions de traitement des acquisitions procédé : détection - localisation - diagnostic (voir § I.1.1.6). Le traitement des signaux bruts provenant des capteurs afin de raisonner sur la base des données propres devient une nécessité afin de générer des commandes sûres en adéquation avec l'état réel des ressources.

Toutefois, le caractère continu-discret des processus batchs induit une limitation des fonctions de détection et localisation de défauts. En effet, les modèles exploités par ces fonctions sont fortement conditionnés par la nature du processus (SEC ou SED) pour être utilisés efficacement dans le contexte de surveillance des systèmes batchs. Dans la possibilité d'utiliser des modèles linéaires, la surveillance "continue" se base principalement sur une détection par traitement des résidus obtenus à partir d'une modélisation redondante du système à surveiller. Le modèle redondant est une image du fonctionnement normal attendu (modèle par équation d'états, équation de transfert, etc.).

La surveillance "événementielle" repose essentiellement sur le concept de chien de garde. La temporisation des opérations discrètes permet d'interpréter les comptes rendus d'exécution selon leur domaine d'occurrence. Les symptômes générés, révélateurs d'anomalies, vont être par la suite diagnostiqués pour déceler les origines des défaillances.

Intuitivement, les modèles continus semblent plus appropriés à la détection des dérives des paramètres physiques ayant lieu au sein des unités. Tandis que la surveillance des durées d'exécution des phases est plus adaptée pour une approche événementielle. L'association des

deux techniques pour concevoir un système de surveillance homogène des processus batchs est donc recommandée.

Le recouvrement des défaillances par application des mesures correctives peut agir :

- soit sur la gestion des procédures de recette (par des mécanismes de gel, de reprise, de reconfiguration dynamique de la commande),
- soit sur le module d'ordonnancement temps réel (par une réactualisation du plan de fabrication en cours),
- soit sur la gestion de mode de marche (évaluation des conséquences de la défaillance d'une unité sur le fonctionnement des autres unités) ou,
- sur le procédé (par des actions d'arrêt d'urgence, arrêt en fin de cycle, arrêt dans un état de repli).

b2 - module de gestion de mode de marche.

L'évaluation de l'état de fonctionnement réel de l'installation suite à une modification d'état des unités ou des éléments de transfert est l'activité principale à assumer par ce module. Il fournit par la même occasion un moyen de vérifier la cohérence des commandes à émettre avec l'état réel des ressources.

Pour une installation batch, le gestionnaire des modes de marche doit impérativement intégrer la commutation entre fonctionnement en mode manuel et mode automatique. En mode manuel, l'opérateur assure la fonction de supervision et de coordination. La tâche du gestionnaire de mode de marche peut se réduire à une opération d'attente de l'ordre de passage en mode automatique.

En mode automatique, le gestionnaire devient opérationnel. Il exploite la connaissance des états individuels des unités, des tronçons de transfert (modélisé chacun par exemple par un graphe d'états) et des dépendances structuro-fonctionnelles existant entre ces derniers. L'évaluation de la nature des dépendances permet alors de générer l'état de fonctionnement d'un groupe d'unités (concept de machines virtuelles et de contraintes de fonctionnement [BOIS91]).

Les états des unités retenus par ce module s'inspirent des différents modes de fonctionnement préconisés par le Guide d'Étude des Modes de Marche et d'Arrêt (GEMMA), par exemple : état_marche_normale, état_marche_dégradée, état_initialisation, état_repos, état_arret_sous_défaut.

Nous résumons dans la figure fig.2.22 les données échangées par les principales activités de la commande de coordination et supervision pour un système batch flexible :

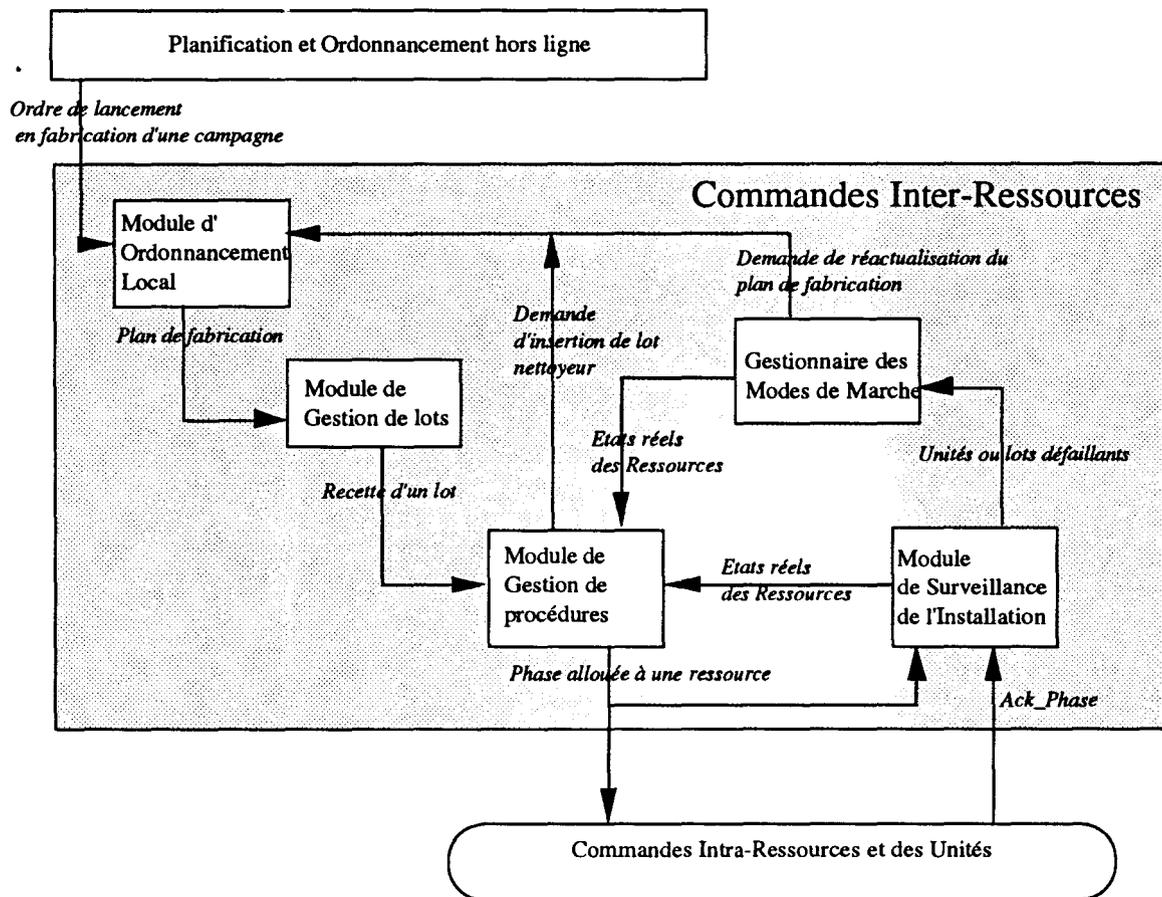


fig.2.22 - Principales activités des commandes inter-ressources.

II.3 - ÉVALUATION DES POSSIBILITÉS DE TRANSPOSITION .

Nous allons discuter dans cette partie des possibilités d'application des méthodes proposées par CASPAIM dans la conception des commandes continues - discrètes de la famille des commandes batches.

II.3.1 - Résumé des commandes batches.

La partie commande d'un système batch peut s'organiser selon une architecture hiérarchisée en deux niveaux assurant des fonctions différentes de :

- 1 - **Commandes inter-ressources** qui assurent le pilotage et la synchronisation de la préparation des lots en cours sur un certain nombre d'unités de transformation.

2 - Commandes intra-ressources qui accomplissent au sein de chaque ressource allouée l'exécution des phases paramétrées et imposées par les commandes inter-ressources.

La description développée précédemment ne permet cependant ni d'évaluer ni de comparer la complexité de la fonction de ces commandes. Une prospection des outils utilisés dans le milieu industriel permet de constater un réel état d'avancement dans la maîtrise de la conception et d'exploitation des commandes internes aux unités. Dans la présentation du [JOUA92], la majorité des outils proposés par les constructeurs de systèmes contrôles commandes* proposent des méthodes plus adaptées à la réalisation des commandes des unités de transformation. Les solutions pour la conception des commandes inter-ressources restent relativement limitées aux installations batchs mono-flux mono-produit ou mono-flux multi-produits.

II.3.2 - Réponses pour la conception des commandes intra-ressources

Les méthodes de conception envisagées par CASPAIM pour la réalisation des commandes intra-ressources sont pratiquement inexistantes. Ce fait peut se justifier par une approche macroscopique des unités de transformation. En effet, considérer les postes de transformation tels que les robots d'assemblage ou les centres d'usinage comme étant des unités "autonomes" dans l'exécution des tâches et "intelligents" par leur capacité de fournir des comptes rendus d'exécution offre l'avantage de se dispenser de la conception des commandes de bas niveau.

Ainsi dans la structuration du système de commande proposée dans [BOUR88], un graphe de processus suffit pour la modélisation de la commande d'un centre d'usinage (fig.2.23).

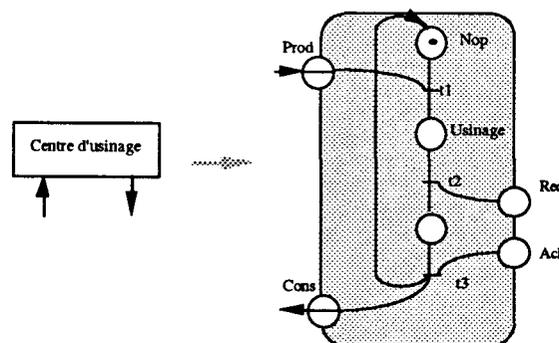


fig.2.23 - Commande d'un centre d'usinage.

* AEG Modicon, Bailey Controls, Fisher Control, Honeywell, FoxBoro, Rosemount, Siemens, Telemecanique, Yokogawa, ...

Bien que la nécessité de décomposer les macro-commandes aveugles en commandes fines soulevée dans [CRUE91] conduise à décomposer les ressources complexes en objets élémentaires actifs. L'insertion d'une interface de commande entre PC¹ et les interfaces procédé a pour but principal de déporter au niveau des ressources les stratégies de fonctionnement mais ne modifie en rien la vue discrète des objets physiques à commander. De ce fait, la conception de l'interface n'apportera pas d'éléments de solution pour les commandes intra-ressources évoquées ici.

Dans le cas des unités batchs, souvent de taille importante et siège de phénomènes physiques difficilement commandables, la réussite des commandes intra-ressources batchs est d'une extrême importance car leur performance contribue de manière déterminante à la qualité du produit. La maîtrise de cette qualité est essentielle et, la maîtrise des performances conduit à améliorer la productivité de l'installation.

De ces constatations, une nouvelle démarche de conception spécifique à cette classe de commande s'impose. Nous proposons dans le troisième chapitre une méthode de la réalisation des commandes des unités. Elle sera explicitée à travers la présentation d'un outil d'assistance et de génération d'automatisme auquel nous avons contribué dans le cadre d'un partenariat recherche industrie.

II.3.4 - Réponses pour la conception des commandes inter-ressources

Les conditions d'application de la méthodologie CASPAIM reposent essentiellement sur les points suivants :

- une vue discrète des lots.
- le caractère de début/fin des opérations de préparation (phases et processus élémentaires).
- la succession sur occurrence d'événement et sur états stables des lots des opérations élémentaires d'une procédure de préparation.
- l'existence de ressources isolées et paramétrables dans le temps et dans l'installation.
- la présence de problème d'indéterminisme dû à la flexibilité du réseau de canalisation, problème de concurrence dû au nombre limité de ressources et de la préparation asynchrone de différents lots de produits, et problème de conflit dû aux incompatibilités possibles entre lots.

¹ PC : Partie Commande ou Commandes inter-ressources

Nous traiterons dans le dernier chapitre de ce mémoire la transformation et l'adaptation de l'approche CASPAIM sur un exemple fictif d'une installation batch flexible. Nous soulèverons au cours de cet étude les points sensibles nécessitant des modifications sur l'état actuel du projet. La dimension du problème nous a conduit à nous intéresser plus précisément à la réalisation des commandes dans le cas d'un fonctionnement normal de la préparation.

II.4 - CONCLUSION

La nécessité d'associer des besoins de nature différente tels que :

- le traitement en phase continue et en phase manufacturière du produit,
- la maîtrise de deux formes de parallélisme (asynchrone et synchrone) dans la gestion des processus élémentaires de préparation,
- une performance de nature continue (qualité de robustesse et de stabilité) et de nature événementielle (respect de la date due) de la partie commande,
- l'élaboration d'une détection homogène des défaillances intégrant la surveillance "continue" des évolutions des paramètres physiques et la surveillance "événementielle" des durées des phases,

reflètent quelques particularités distinctives des systèmes de production continus discrets par rapport aux SEDs ou SECs.

Deux classes de systèmes à états continus discrets peuvent être distinguées en fonction de la possibilité de découpler ou non le niveau supervision et coordination de la partie commande. La mise en œuvre des processus élémentaires localisés sur des supports physiques isolables de la partie opérative (critère des ressources temporairement isolées et temps fini d'exécution des processus élémentaires) permet de hiérarchiser en un niveau de supervision SED qui est maître d'un niveau inférieur de nature SEC.

De nombreuses réalités industrielles appartiennent à cette dernière classe des SECs. Il s'agit en particulier des systèmes de production à traitement par lots ou les systèmes batchs dont les caractéristiques principales peuvent se résumer dans la figure 2.24. Les commandes batchs peuvent être structurées en commandes inter-ressources assurant la fonction de coordination et supervision, et en commandes intra-ressources exécutant les phases allouées. L'évaluation d'une éventuelle transposition de l'approche CASPAIM dans la conception des commandes batchs révèle une réelle possibilité de réutiliser des connaissances récentes issues du domaine SED en vue de l'élaboration des commandes batchs **inter-ressources**.

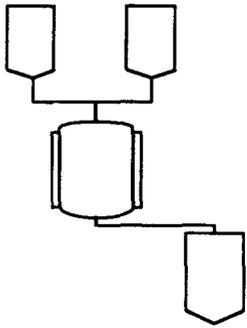
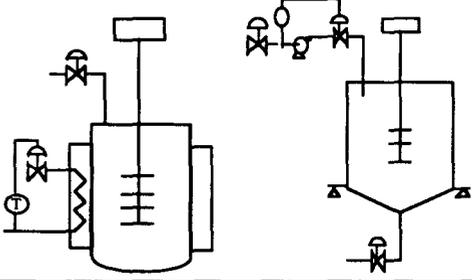
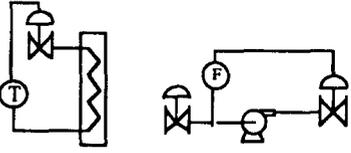
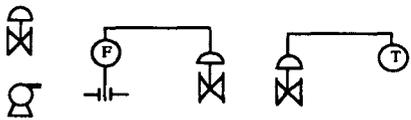
Niveaux physiques		Fonctions et Nom de Commande associées
Lignes de fabrication		<p>Recette d'un lot <u>identification : En tête</u> formule</p> <ul style="list-style-type: none"> - composition, - quantité, qualité, - propriétés physiques - Conditions de sécurité, hygiène, <p>Procédure d'un lot Séquence de phases (séquentiels et/ou parallèles)</p>
Unités physiques		<p>Phases</p> <p>charger les ingrédients chauffer, mélanger, faire réagir refroidir vider un lot nettoyer</p>
Objets physiques évolués		<p>Opérations de base ou génériques</p> <p>ouverture d'un circuit suivre un profil de température agiter un lot</p>
Objets physiques élémentaires commandables		<p>Actions élémentaires</p> <p>Ouverture, fermeture d'une vanne demarrer, arreter une pompe activer une boucle PID.</p>

fig.2.24 - Décomposition modulaire d'un procédé batch et commandes associées

CHAPITRE III

CHAPITRE III

REALISATION DES COMMANDES INTRA-UNITES

INTRODUCTION.

Dans le chapitre précédent nous avons constaté que l'abstraction des commandes internes aux ressources faite par la conception des systèmes de commandes des SEDs ne peut pas s'appliquer aux systèmes à états continus-discrets tels que les unités de transformation batchs.

Ce chapitre sera consacré à une proposition de réalisation des commandes internes aux unités batchs. La méthode de développement proposée est supportée par un outil nommé "OPERA : Outil de Production d'Etude et de Réalisation d'Automatisme" qui est réalisé en collaboration avec la division Contrôle Bailey de la société CEGELEC.

III.1 - PRESENTATION

Proposer un outil d'aide et d'assistance dans l'étude et la réalisation d'automatisme d'une unité de production aux techniciens des services de méthode représente l'idée directrice qui a donné naissance au projet "OPERA". Le champ d'application de l'outil réalisé se situe par rapport au modèle de référence CCGA du cycle de vie aux phases de conception et de réalisation (fig 3.1). Le concepteur partira alors d'une description détaillée du Plan de Circulation des Fluides (P.C.F.) du procédé et sera guidé suivant une méthode d'approche rationnelle jusqu'à la production de codes automates de la gamme ZS ALSPA C500.

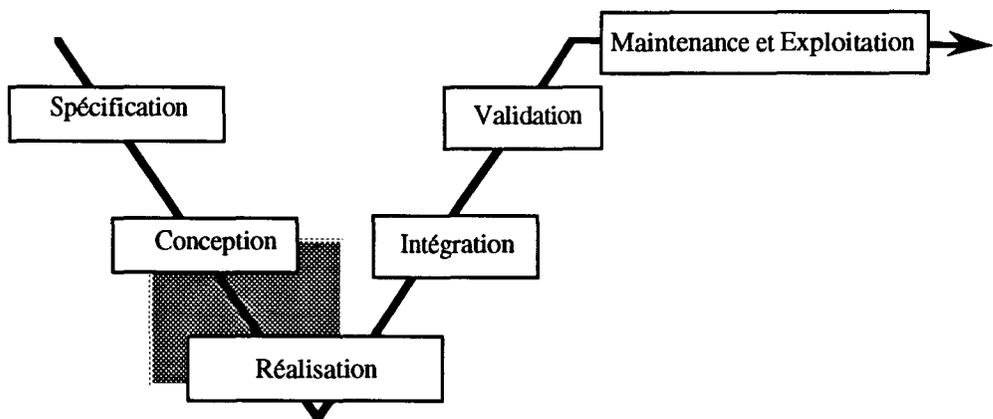


fig 3.1 - Position de l'outil OPERA.

Cette partie comprend :

- une spécification des besoins et des objectifs visés par le constructeur qui montrent le bien fondé d'une utilisation d'un outil type CAO dans la chaîne de traitements d'une affaire client.
- ensuite, une description détaillée des concepts retenus pour répondre aux spécifications établies précédemment et aux critères d'évolutivité de l'outil. Nous expliciterons plus particulièrement l'adéquation du langage de programmation de l'automate cible dans la prise en compte simultanée des fonctions continues de régulation et des automatismes séquentiels.
- et enfin, une présentation de l'outil OPERA pour la réalisation des automatismes de commande d'une unité de distillation.

III.2 - SPECIFICATIONS GENERALES DES BESOINS.

III.2.1 - La Problématique.

Spécialisé dans le domaine d'activité d'étude et de réalisation de systèmes contrôle-commande d'unités de production, le concepteur fait face à des difficultés d'ordre méthode de traitement des affaires clients et d'ordre procédé. Ces difficultés peuvent s'identifier dans :

a - un problème d'organisation interne et les retombées sur la méthode de réalisation. Ces faits peuvent s'interpréter principalement en terme de :

- **Personnalisation des études et développement.** On constate en fait autant de démarches différentes que d'ingénieurs qui traitent une même affaire client.
- **Inexploitation des expériences et des acquis.** Ce fait se traduit par l'impossibilité de réutiliser le savoir-faire et les solutions efficaces déployées au cours d'affaires antérieures. Les raisons sont multiples : confidentialité de dossiers, équipes de développement différentes, manque d'outils adaptés à la gestion des connaissances acquises.

b - la complexité inhérente au procédé à automatiser. Les principaux facteurs de complexité rencontrés à ce niveau se présentent par :

- **la taille du procédé.** Chaque unité du procédé contient une quantité considérable d'équipements matériels qui sont fonctionnellement liées par des interactions complexes. La prise en compte d'un nombre important de signaux d'Entrées/Sorties pendant les phases de développement de l'automatisme pose le problème de structuration et de répartition sur les organes informatiques de commande. En fait, les critères de structuration et d'affectation des automatismes relèvent plus de l'expérience personnelle et des intuitions de l'ingénieur.
- **le traitement manuel des études et de la pré-réalisation des automatismes.** La saisie manuelle des spécifications du P.C.F ainsi que celles de l'organisation système (structure automate) ne permet pas une vérification immédiate de l'intégrité de la base de données à partir de laquelle vont s'élaborer les automatismes de commande.

III.2.2 - Procédure d'étude et de traitement actuel.

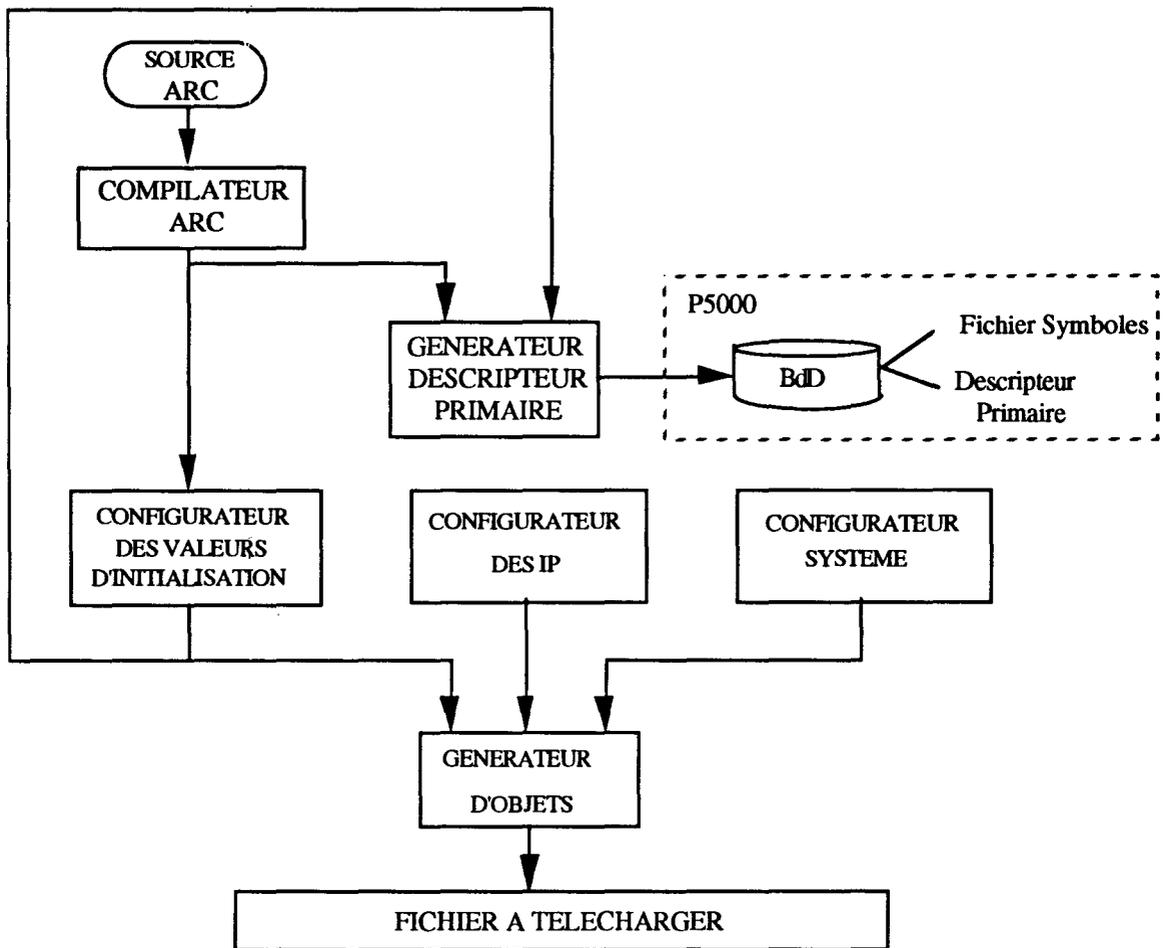
III.2.2.1 - Architecture du système [DOZS1].

L'architecture matérielle qui supporte les automatismes de commande à concevoir s'articule autour d'un réseau local industriel propriétaire SICOWAY sur lequel se connectent :

- un poste de conduite et de supervision de processus (Alspa ZS P5000). Le P5000 est le poste de travail de programmation des automatismes et de conduite du procédé. Les moyens d'exploitation sont regroupés sur chacun des pupitres qui disposent d'un ensemble de touches pré-définies pour assurer la communication homme-machine.
- et l'automate régulateur Alspa ZS C500 [DPS50]. Le C500 effectue l'acquisition des signaux logiques et analogiques issus du procédé au moyen des cartes Interfaces Procédé (IP) et transmet les informations au poste de conduite après traitement éventuel. Il réalise les algorithmes de régulations, les fonctions d'automatisme combinatoire et séquentielle associées. Il restitue au procédé les informations et commandes liées à ces fonctions d'automatisme et de régulation.

La mise en œuvre de l'automate comporte une configuration en phases successives (fig 3.2.a) permettant de l'adapter au procédé. Cette adaptation implique une définition :

- de l'algorithme d'automatisme et de régulation écrits en langage ARC puis compilés à l'aide du compilateur ARC.
- du câblage à l'aide du configurateur d'interfaces procédé IP.
- des réglages à l'aide du configurateur des valeurs d'initialisation



Note :

Compilateur ARC :

il contrôle la syntaxe du programme ARC et génère le code objet.

Configurateur des IP :

il affecte géographiquement chaque IP à une adresse physique.

Configurateur des valeurs d'initialisation :

il initialise les valeurs par défauts des variables ARC et le cycle de déroulement des contrôleurs du programme.

Configurateur système:

il personnalise les abonnés d'une application.

Générateur descripteur primaire:

il charge dans la base de données du P5000 les variables du C500 déclarées comme conduite.

fig 3.2.a - Chaînage des configurateurs du C500.

.III.2.2.2 - Le langage ARC [DPS50].

III.2.2.2.1 - Présentation.

Le langage ARC (Automatisation-Régulation-Calcul) a été conçu pour programmer les automates C500. Il répond à des besoins propres de la conception de commande et de surveillance en temps réel des procédés industriels de type "continu" et "batch : discontinu". Son utilisation dans ce cadre permet de résoudre des problèmes :

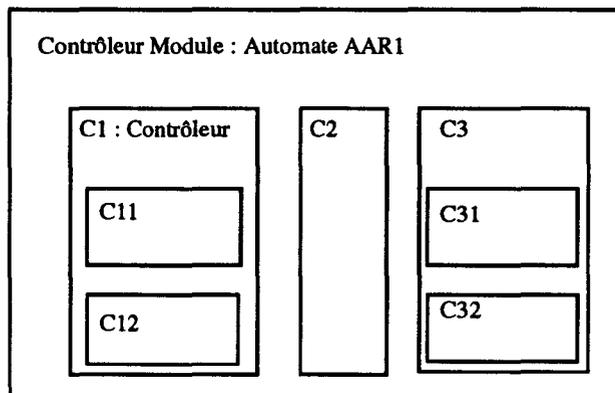
- de **régulation**. Il permet d'effectuer des calculs, des traitements par fonctions numériques de régulation simple ou complexe (avec possibilités de passage du mode automatique en manuel et vice versa) et par la logique combinatoire.
- de **sécurité**. L'analyse et l'écriture des sécurités sur les procédés industriels sont prises en compte par l'introduction de détection d'exception et de traitements associés.
- d'**automatismes séquentiels**. Il possède la structure nécessaire pour passer directement d'une analyse de l'automatisme faite sous forme de graphes (Grafcet, automates finis, Réseau de Petri Sauf) à une écriture littérale.

Le langage ARC possède par ailleurs les possibilités d'un langage de programmation de haut niveau pour l'écriture des programmes lisibles, structurés et dispose des facilités de manipulation de données d'ordre procédé.

III.2.2.2.2 - Structure.

Un programme ARC est structuré en niveaux hiérarchiques de blocs fonctionnels appelés "**Contrôleurs**". Le corps du programme automate est alors défini sous forme d'architecture arborescente de contrôleurs. Cette structure s'appuie sur la décomposition en éléments structurels et/ou fonctionnels de l'unité physique. Six niveaux d'imbrication au maximum sont autorisés par l'automate C500.

a - Représentation imbriquée



b - Représentation arborescente

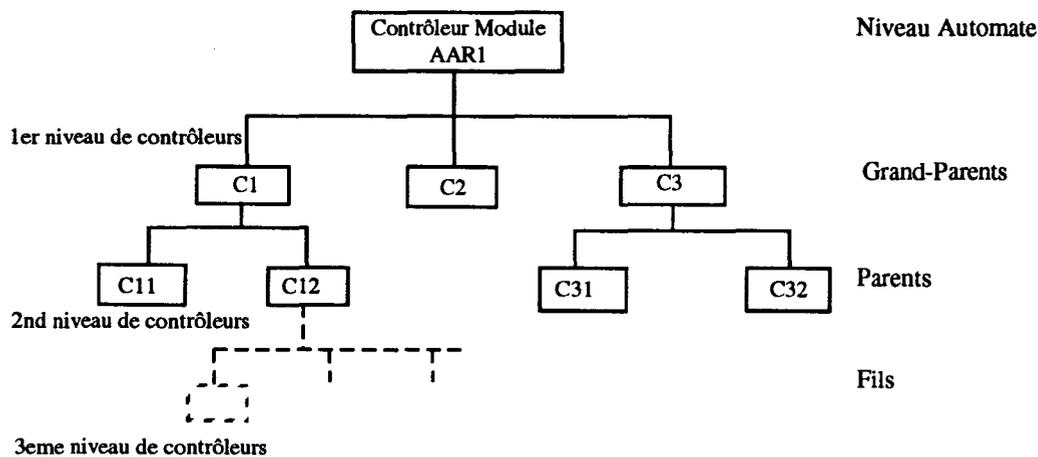


fig 3.2.b - Structure d'automatisme décrit en langage ARC

Les Contrôleurs.

Un contrôleur est un programme qui décrit le fonctionnement d'une partie de l'unité. La hiérarchie structurelle du langage impose des règles de communication entre contrôleurs :

- un contrôleur hérite de la connaissance de ses "ancêtres directs". De ce fait, il reconnaît et peut manipuler les variables définies par ces parents directs.
- un contrôleur reçoit des ordres uniquement de son parent direct (ordre d'activation ou désactivation).
- et un contrôleur commande uniquement ses descendants directs (activation ou désactivation des contrôleurs niveau fils).

La communication horizontale n'existe pas.

L'écriture d'un contrôleur ARC se décompose en deux parties :

- La partie **Déclarations** qui définit les éléments manipulés par l'algorithme. Ces éléments sont des noms de variables à déclarer,
 - des noms de sous-programmes à inclure lors de la compilation,
 - des contrôleurs fils à déclarer.
- La partie **Algorithmes** qui est composée d'une suite d'instructions détaillant la commande d'une partie du procédé.

La Partie algorithme d'un contrôleur.

L'algorithme de commande et de surveillance à développer dans cette partie comprend :

- une partie **continue**. Le concepteur y explicite les fonctions de régulation, de logique combinatoire et de détection d'exceptions.
- une partie **séquentielle**. Cette partie est réservée à l'écriture littérale d'un automatisme décrit sous forme de Réseau de Pétri Sauf, d'automate à états finis ou de Grafset.
- une partie **anomalie**. Le traitement associé aux anomalies détectées dans la partie continue et des exceptions est détaillé dans cette partie.

Chacune de ces trois parties de l'algorithme est facultative mais l'une au moins doit être présente. Leur combinaison permet de définir deux types de contrôleurs :

- Contrôleurs Continus.

Ce type de contrôleurs ne possède pas de partie séquentielle. Il peut contenir une partie anomalie facultative qui sert à traiter les défauts systèmes. La partie algorithme est traitée linéairement par la machine virtuelle (unité centrale) qui exécute toutes les instructions à chaque cycle automate.

- Contrôleurs séquentiels et contrôleurs séquentiels d'exception.

Un contrôleur séquentiel est réservé à la description littérale d'un graphe de comportement. Il est composé d'une suite de **pas** (équivalent d'étapes en Grafset) appelée **séquence**. L'ensemble de l'algorithme n'est pas exécuté à chaque cycle automate; seul le pas actif qui l'est.

Un contrôleur séquentiel peut comporter deux parties dont :

- une partie continue permettant de faire de la logique combinatoire ; elle est exécutée à chaque cycle automate quelque soit le mode de fonctionnement.
- une partie séquentielle, composées d'une suite de pas exécutés un par un à chaque cycle.

III.2.2.2.3 - Syntaxes et Exemple

a - Résumé des principales variables et instructions.

Le tableau suivant résume les éléments de base manipulés par le langage ARC.

Variables	Mode de Conduite	Type
Externes	Entrée	Logique Analogique Entier Simple
	Sortie	Logique Analogique Entier Simple
Interne	Locale Conduite Réglage	Logique Analogique Entier Tempo Simple
	Evénement	Type Spécial énuméré (var., explicite) structuré (table) Type spécial défini par utilisateur énumération d'états et de gravité

fig 3.2.c - Tableau recapitulatif des types de variables ARC.

b - Exemple d'application et programmes ARC associés.

Pour illustrer cette approche prenons l'exemple d'un réacteur chimique qui doit réaliser la séquence d'opérations suivantes : Mélange -> Chauffe -> Vidange.

L'opération de chauffe nécessite l'élaboration d'une grandeur réglée (VN_) à l'aide d'un régulateur PI (Proportionnelle et Intégrale). L'action de réglage est fonction de l'écart entre la consigne externe (CE_) et la mesure de température qui doit être visualisée sur le poste de conduite (MT1_) et surveillée par deux seuils : seuil Bas (SB_) et seuil Haut (SH_). Ces seuils sont alarmés suivant le degré de gravité défini par l'utilisateur. La procédure de réalisation des programmes ARC associés est illustrée par schéma suivant.

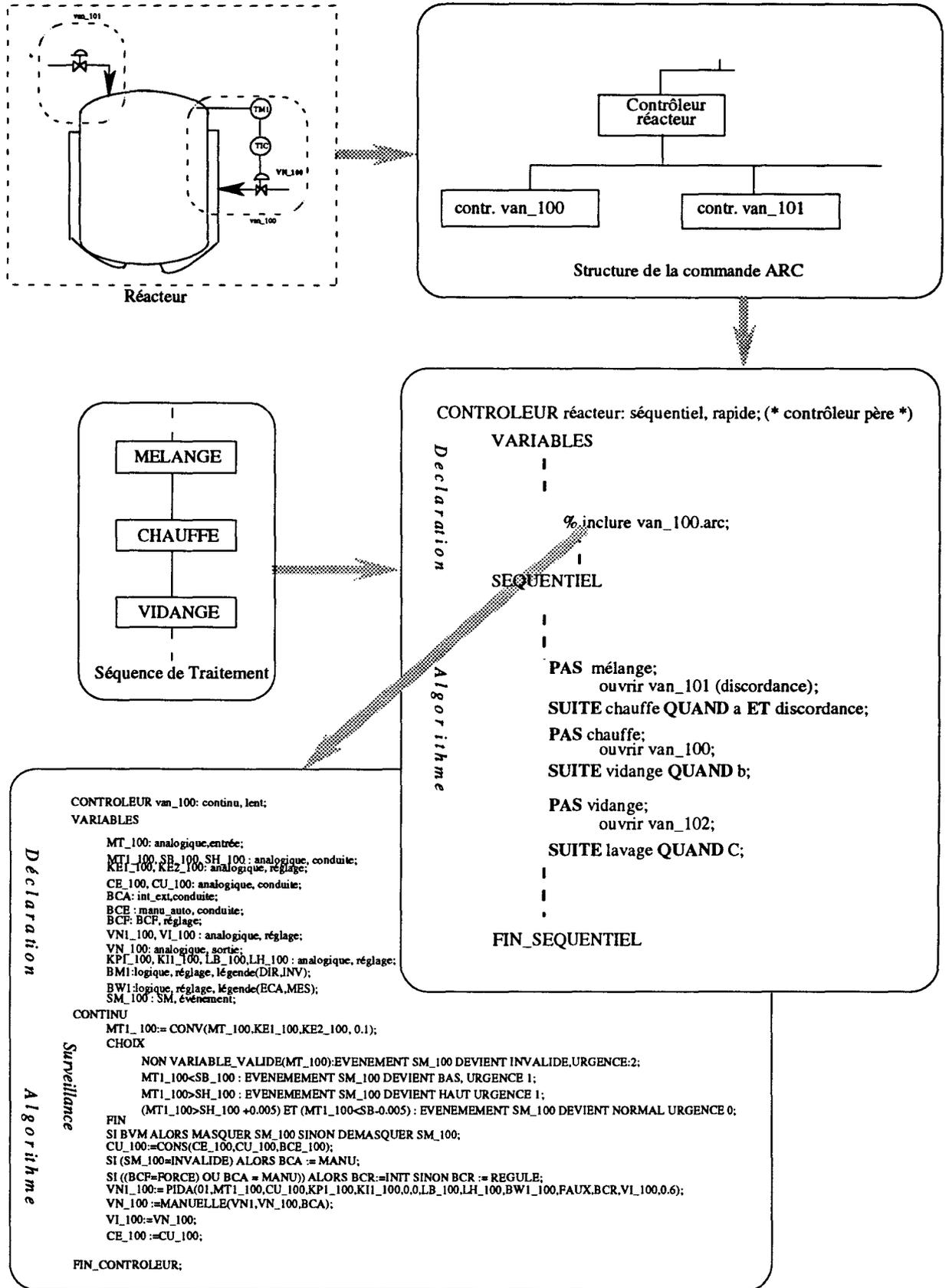


fig 3.2.d - Exemple de programme ARC.

III.2.2.3 - Procédure de développement actuelle.

Rappelons que la production d'un programme ARC final pour un procédé spécifié par son P.C.F (fig 3.2.a) résulte de la compilation :

- des programmes contrôleurs à variables non instanciées,
- du fichier d'informations concernant les caractéristiques des cartes électroniques d'interface avec le procédé (configuration des IP) ,
- des informations sur la structure en contrôleurs de l'automate (configuration système).
- et du fichier des valeurs d'initialisation des variables manipulées par fonctions de calculs.

Pour obtenir ces données, une première étape de réalisation, au cours de laquelle l'utilisation de l'outil OPERA doit apporter une aide et une assistance intelligentes, comporte des phases de saisie manuelle à l'aide d'un dossier de formulaires préformatés. La spécification se déroule alors selon l'ordre suivant :

IDENTIFICATION DES ENTREES/SORTIES (E/S)



IDENTIFICATION DES IPs



TRAITEMENT DES E/S

(i) - Identification des E/S.

Cette phase consiste en la création des variables procédé d'entrée ou sortie en lui donnant un repère d'étude. Ce repère d'étude est obligatoirement renseigné sur l'automate et le contrôleur dans lesquels il va être manipulé.

(ii) - Identification des IPs.

Les caractéristiques de l'IP d'acquisition (respectivement de commande-réglage) qui produit la variable d'entrée (respectivement de sortie) créée sont explicitées dans cette phase. Elles définissent :

- la nature et le type de capteur (ou actionneur) associé.
- l'échelle et la plage de variation de la grandeur à acquérir.
- le type de signal et le type d'IP utilisés.
- le repère géographique de l'IP et le numéro de voie associée au repère d'étude.

- et des informations particulières telles que :
 - * l'alimentation capteur (interne ou externe).
 - * la compensation soudure froide.
 - * le repli.
 - * le repère IP géographique de Secours.

(iii) - Traitement des E/S.

Dans cette phase, il s'agit de spécifier les traitements élémentaires à effectuer sur les signaux procédé fournis par le capteur (ou sur les variables de commande-réglage à destination des actionneurs). Ces opérations de traitement sont, par exemple, du type linéarisation, filtrage, échelle de visualisation, détection de seuils pour un signal analogique d'entrée.

Les fichiers de commande ARC s'obtiennent selon une démarche intuitive qui s'apparente à une réalisation ascendante (bottom up) du programme automate. En effet, la programmation des contrôleurs de bas niveau de l'arborescence (contrôleurs de niveau feuille) est presque immédiate. Il y a deux raisons à cela :

- a - le type de commande à transcrire en langage ARC est déjà défini dans le P.C.F du procédé. Exemple pour le contrôleur qui va contenir la boucle de commande suivante :

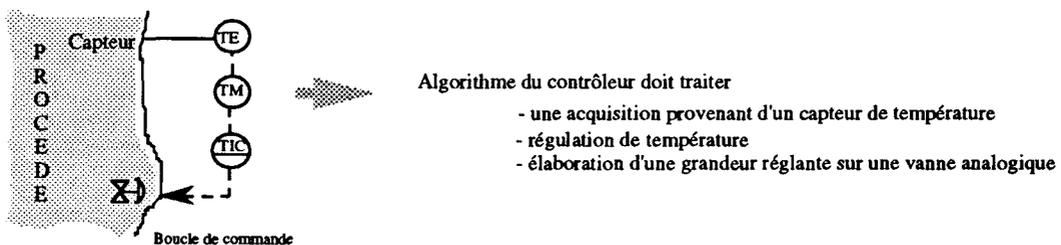


fig 3.3.a - Exemple d'une boucle de commande élémentaire.

- b - l'élaboration des programmes contrôleurs est facilitée par l'utilisation d'un certain nombre d'algorithmes ARC génériques en les personnalisant à l'automate et au contrôleur qui vont les contenir.

La réalisation des programmes ARC pour les contrôleurs de niveau haut de l'arborescence (contrôleurs père, grand-parents, ...) qui vont commander ses contrôleurs fils, fait appel au contexte de l'étude et à l'expérience du concepteur.

III.2.3 - Les Objectifs[CONT90].

L'outil à concevoir doit guider le développement des automatismes selon une méthode d'approche rationnelle. La méthode retenue impose une démarche qui se résume par la procédure constituée des étapes suivantes :

- 1 - Etape de spécification fonctionnelle du procédé : **description de l'unité.**
- 2 - Etape de **description de l'organisation système.** (spécification de la structure en contrôleurs de l'automate C500).
- 3 - **Description des fonctions de prétraitement** (traitement des grandeurs d'acquisition (entrées) et de commande-réglage (sorties)) des boucles de commandes simples et **construction graphique de l'algorithme de commande.**
- 4 - **Assemblage** de la boucle de commande qui est composée de bloc de prétraitement d'acquisition, de fonction algorithme et de bloc de post-traitement de commande-réglage. Cette dernière étape se termine alors par la possibilité de générer le programme ARC associé.

L'aide et l'assistance apportées pendant ces étapes de développement doivent nécessairement contribuer à l'amélioration de la procédure de réalisation actuelle. Elles doivent se concrétiser par :

- une **capitalisation du savoir-faire.** L'outil doit permettre l'archivage dans différents types de bibliothèque les règles de test de validation,
 - * les règles de proposition de choix,
 - * les fonctions de traitement élaboré.
- un **gain de temps** de développement. L'outil doit impérativement offrir des fonctions utilitaires du type :
 - * copie ou duplication des lignes de description,
 - * proposition en ligne des choix possibles suivant le contexte et l'étape de développement.
- une **qualité** de l'automatisme. L'outil doit effectuer systématiquement une vérification sur la validité des spécifications décrites par l'opérateur. Cette vérification doit comporter des opérations de test de cohérence, de complétude avant enregistrement de toute création ou modification de données.
- une **maintenabilité** de l'outil. Il importe de vérifier que l'architecture retenue (matérielle, logicielle, et structurelle) pour réaliser l'outil est potentiellement évolutive

afin de pouvoir être étendue ultérieurement aux applications d'automatismes logiques, séquentielles et de conduite.

Des caractéristiques générales sont requises pour cet outil de travail telles que :

- la convivialité de l'interface homme/machine,
- la sûreté et l'efficacité par un système de protection et de sauvegarde intelligente des données,
- la portabilité de l'outil assurée par le choix d'une plateforme (matérielle et logicielle) utilisant des "standards" de l'industrie.

III.3 - DEMARCHES ET CONCEPTS DE REALISATION[SPEC89].

PRESENTATION.

Indépendamment des modules auxiliaires d'introduction et d'utilitaires, l'outil OPERA est constitué de deux parties principales (fig 3.3.b) :

1 - **la partie frontale** comprenant des procédures d'acquisition des informations relatives à :

- * l'Identification de l'Affaire client,
- * à la Description du Procédé,
- * aux Spécifications du Système et,
- * aux Spécifications de l'algorithme de commande (Génération de Modules).

L'outil impose alors que la saisie de ces informations s'établisse selon l'ordre naturel de prise de connaissances des données concernant une affaire à traiter, des positions et des décisions pour la solutionner. Ces acquisitions permettent d'enrichir une base de données de spécifications qui va être affinée progressivement pour être complète à la fin de la description de l'algorithme de commande.

Ces phases d'acquisition sont assistées dans chaque procédure par :

- une proposition d'une liste de choix,
- une configuration du nombre et de la nature des données à saisir,
- une déduction automatique de certaines réponses.

Cette assistance a été rendue possible grâce à l'intégration d'une base de connaissances et de règles résultant de l'expérience dans ce domaine d'activité.

2 - la partie terminale de génération de programme.

- L'exploitation des spécifications contenues dans la base de données de l'outil s'effectue dans cette procédure. Elle s'appuie sur les connaissances et les règles de programmation du langage ARC pour réaliser la génération de code.

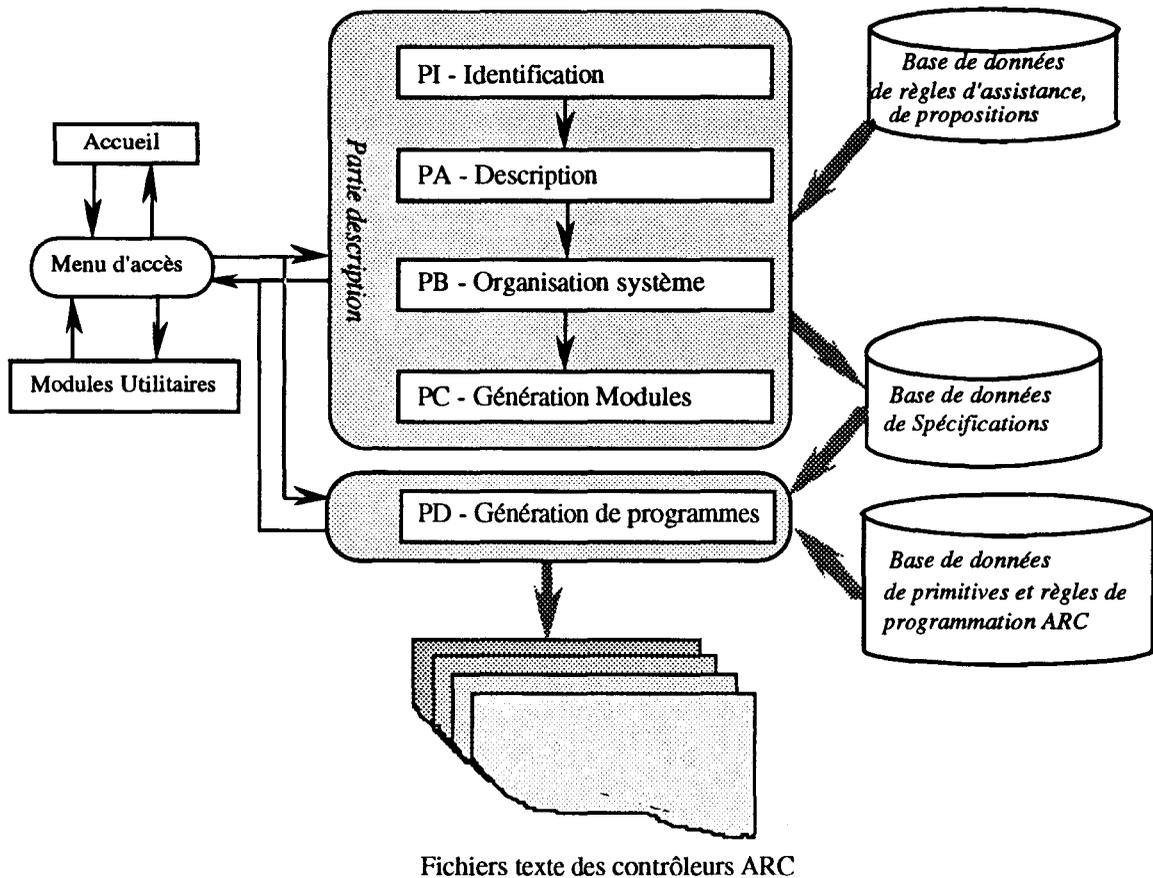


fig 3.3.b: Organisation structurelle de l'outil OPERA.

Exemple d'application traité : Colonne de distillation.

Afin d'illustrer la méthode de conception, nous proposons de travailler sur l'exemple de procédé présenté (fig 3.4) qui est destiné à séparer les composants d'un produit d'entrée, dénommé : le BRUT, dans la colonne. Le DISTILLAT et le résidu sont les produits obtenus par distillation. Cette séparation met en œuvre un processus d'échange thermique entre une source chaude (injection de vapeur dans le rebouilleur) et une source froide (condenseur alimenté en eau froide). La concentration du distillat est obtenue par réglage de la température au niveau du plateau de soutirage (injection d'une partie du distillat : REFLUX).

III.3.1 - Procédures d'acquisition des spécifications.

III.3.1.1 - Spécification du procédé.

La description du P.C.F entreprise dans cette première procédure de spécification se déroule suivant **une approche descendante**. Elle consiste à découper le P.C.F en différents niveaux d'entités fonctionnellement autonomes et hiérarchisées. L'objectif de ce découpage est de regrouper dans une même entité les éléments participant à l'élaboration de la même fonction.

Une unité est alors décomposée en un premier niveau d'entités. Ces dernières, à leur tour, vont être décrites de la même manière pour arriver finalement à un niveau d'entités élémentaires qui seront, par exemple, du type :

- boucle simple de régulation,
- moteur ou vanne tout ou rien.

Les objets de spécification.

Chaque entité fonctionnelle créée sera identifiée par :

- un **nom** d'entité,
- un **repère procédé**,
- un **numéro d'entité** significatif de son niveau dans l'arborescence.

Concernant les entités de bas niveau contenant normalement de boucles simples de commande, une boucle élémentaire est renseignée par :

- un **repère d'étude** unique affecté à chaque signal d'E/S procédé. Ce nom doit respecter la codification de désignation d'une variable E/S.
- un **repère client** associé,
- un **libellé**,
- l'**échelle procédé** du signal E/S,
- l'**unité physique** de ce signal,
- la **nature d'E/S** définissant le capteur (respectivement actionneur) produisant le signal (respectivement recevant l'action de commande),
- le **type d'E/S** concernant le type du capteur ou actionneur correspondant,
- un champ **autres** qui peut contenir des commentaires.

Aide et Assistance proposées.

L'assistance de l'outil s'effectue dans les étapes de :

- découpage fonctionnel. Elle réside essentiellement dans le choix d'une construction **graphique** pour faciliter l'élaboration de l'arborescence. L'opération de découpage est

assistée par des fonctions de création, modification, suppression avec des règles de numérotation automatique, de repositionnement automatique des entités.

- spécification de boucle de commande. L'assistance se présente sous forme :

* d'aide propositionnelle au cours de la saisie. Il s'agit de proposer à l'utilisateur une liste de choix possibles en relation avec les données déjà acquises. Cette aide peut se résumer sous forme de règles propositionnelles suivantes :

(i) - Règle Repère d'étude/Nature Signal :

SI 1^{er} caractère du repère d'étude == "x"

ALORS proposer nature d'E/S = "yyy"

Exemple : repère d'étude : TT100 (codification d'une variable de température), proposer la liste "THC" (thermocouple), "PT3" (platine) pour nature de signal.

(ii) - Règle Nature d'E/S/Type d'E/S :

SI nature_E/S == "xxx"

ALORS proposer type_E/S = "yyy"

Exemple : nature d'E/S = "THC" (thermocouple) proposer la liste de type : "T", "E", "K", "S", "B", "J", "R" .

* de test de cohérence. Ce test de cohérence est effectué systématiquement avant chaque enregistrement de données.

* de fonction de restitution et de copie de ligne de champs qui permet d'accélérer la saisie des spécifications d'un nombre important de boucles de commande identiques.

Description procédé de l'unité de distillation.

L'unité peut se décomposer en trois entités principales dont :

E1 : l'alimentation et rebouilleur

E2 : la colonne.

E3 : le condensateur.

Chacune de ces entités peut se décomposer en entités élémentaires. En prenant l'entité E2, elle peut se diviser en second niveau d'entités : E21, E22, E23, E24. L'entité

terminale E23 contient une commande élémentaire qui est la boucle de régulation de niveau comprenant :

- un capteur de niveau (interface procédé),
- une acquisition du signal d'E/S LT101,
- une action PID,
- une génération de la commande réglage LV101,
- un actionneur : vanne analogique (interface procédé).

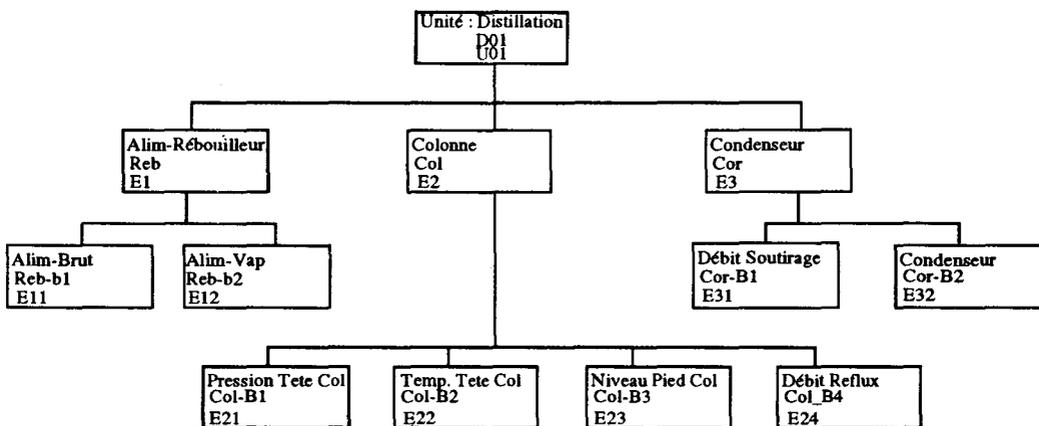
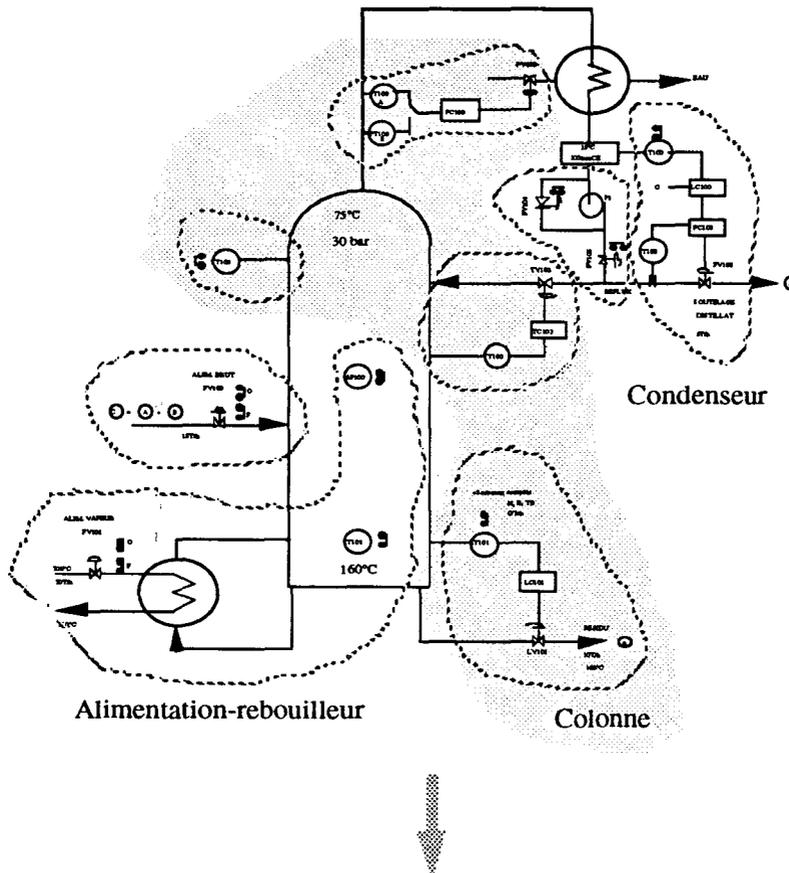


Fig 3.5 - Découpage arborescent de l'unité.

Les boucles simples de commande seront explicitées par une page de renseignements. La boucle de l'entité terminale E23 est renseignée par le tableau suivant :

Rep Entité	Rep Etude	Rep Client	Libellé	Ech Procédé	Unité Physique	ACQ-SORTIE	
						Nature	Type
E23	LT101	LT101	Niveau Pied	?	M	HN	V
E23	LV101	LV101	Commande	?	M	CA	-

III.3.1.2 - Spécification de l'organisation système.

L'objet de cette seconde étape de spécification consiste à identifier la partie support informatique de commande. Il comporte alors l'acquisition des caractéristiques des IPs affectés aux signaux d'E/S. Ces informations serviront à constituer le fichier de configuration des IPs nécessaire au générateur de code objet (voir fig 3.2.a). Cette phase comprend aussi la description de la structure en contrôleurs du programme automate associé.

L'organisation en contrôleurs de l'automate C500 associé est obtenue par simple **transposition** de l'arbre des entités élaboré dans la précédente étape. Une telle transposition directe a été possible grâce l'architecture arborescente d'un programme automate écrit en langage ARC (voir § III.2.2.2). La structure automate va hériter de la structure résultant du découpage de l'unité en entités fonctionnelles, et se réaliser par l'affectation d'une **unité en automate** et d'une **entité en contrôleur**.

Les objets de spécification.

De manière analogue pour une entité, un contrôleur sera renseigné par :

- un **nom** de contrôleur hérité du nom de l'entité,
- un **repère contrôleur** hérité de celui de l'entité,
- un **numéro de contrôleur** significatif de sa position dans l'arborescence.

Concernant les contrôleurs de bas niveau, images des entités élémentaires, la boucle élémentaire de commande va être renseignée sur :

- **échelle IP** affectée au repère d'étude,
- **type de signal** ,
- **type de IP**,

- repère géographique de l'emplacement de la carte IP,
- Numéro de voie de l'IP affecté au repère d'étude,
- repère de voie selon une codification interne,
- type d'alimentation capteur (interne ou externe),
- compensation soudure froide,
- repli,
- surveillance ligne,
- repère géographique d'un IP de secours.

Aide et Assistance proposées.

L'aide et l'assistance apparaissent dans les étapes de :

- structuration en contrôleurs du programme automate. Elle repose sur le choix d'une construction **graphique** pour compléter l'ossature arborescente transposée. Au cours de cette opération, des fonctions de création, modification, suppression avec des règles de numérotation automatique, de repositionnement automatique des entités sont proposées à l'utilisateur.
- spécification de boucle de commande. L'assistance se présente sous forme :
 - * d'aide propositionnelle au cours de la saisie. Il s'agit de proposer à l'utilisateur une liste de choix possibles en relation avec les données déjà acquises lors de la spécification du procédé. Cette aide peut se résumer sous forme de règles propositionnelles suivantes :
 - > Règle (Nature d'E/S et type d'E/S et Type de signal)/Type IP :

<u>SI</u>	nature_E/S == "une_chaine"	<u>ET</u>
	type_E/S == "xxx"	<u>ET</u>
	type_signal == "une liste de caractères"	
<u>ALORS</u>	proposer l'IP = "IPxyz"	
- * de test de cohérence. Les tests de cohérence vérifient la compatibilité des données saisies dans cette étape par rapport à celles qui ont été déjà acquises dans l'étape de description procédé. Des contraintes de compatibilité existent entre :

- (i) - Echelle procédé, bornée par (E_{prmin}, E_{prmax}) et Echelle IP bornée par (E_{ipmin}, E_{ipmax}) . L'échelle de l'IP doit être choisie de façon à ce que la relation suivante soit respectée : $E_{ipmin} < E_{prmin} < E_{prmax} < E_{ipmax}$.
- (ii) - Type IP et Numéro de Voie. Une IP d'un type donné dispose d'un nombre fini de voies. Le test sur cette relation doit vérifier pour chaque IP si on a affecté plus de voie qu'elle en a.
- (iii) - Type IP et Position géographique. L'automate utilise des emplacements repérés par les colonnes A, B, C, D, E, F pour localiser les cartes IPs. Chaque colonne a une capacité dimensionnelle de 12 pas. Deux dimensions d'IP existent : IP analogique de longueur de 3 pas et IP logique de longueur de 6 pas. Un test de non empiètement des IPs est à effectuer pour leur répartition cohérente dans les colonnes d'un automate.

Exemple de structure automate transposée de la structure de l'unité.

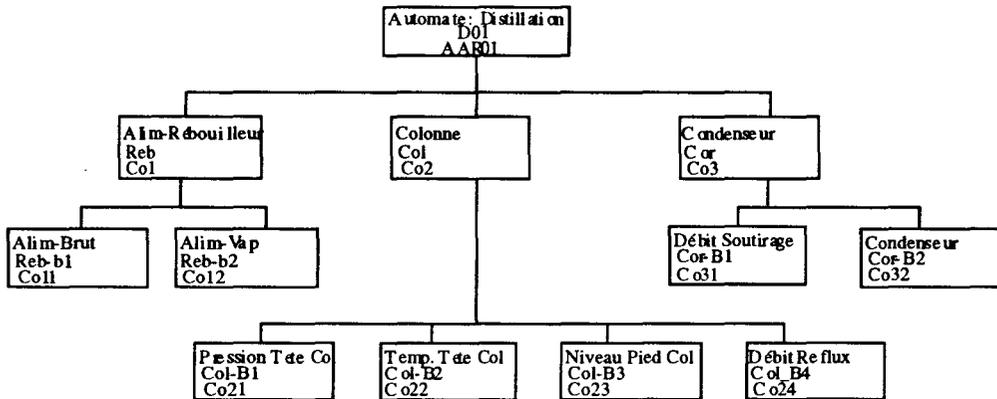


fig 3.6 : Structure du programme automate associé l'unité de distillation.

III.3.1.3 - Spécification des modules de traitement

III.3.1.3.1 - Principes.

Dans cette troisième étape d'acquisition de données, la spécification s'intéresse plus particulièrement aux boucles élémentaires de commande contenues dans les contrôleurs du niveau bas de l'automate. Elle complète la base de données de spécification en permettant la saisie des fonctions de traitement des signaux et de calculs de régulation.

Chaque boucle de commande est considérée comme la réunion de trois zones traitements :

- (i) - zone d'acquisition,
- (ii) - zone de traitement,
- (iii) - zone de commande-réglage.

La zone d'acquisition comprend la définition d'une liste de fonctions de prétraitement du signal brut provenant d'un capteur. Le rôle de ces fonctions est de :

- tester la validité du signal procédé dont le résultat est enregistré dans un drapeau de validité surveillé à partir du poste de conduite.
- surveiller l'évolution du signal procédé en définissant les seuils de sécurité et les alarmes associés.
- de présenter le signal procédé sous une forme appropriée pour les fonctions de la zone de traitement.

Ces fonctions sont regroupées dans une configuration générique appelée : **Module de Base d'Acquisition (MBA)**. En fonction de la nature et du type du signal d'entrée (repère d'étude), une configuration de fonctions de prétraitement est alors proposée. L'utilisateur l'adopte ou le modifie selon les besoins de son application pour obtenir, dans ce dernier cas, un **Module Spécifique d'Acquisition (MSA)**.

La zone de traitement concerne la définition de la partie algorithme de calcul pour générer l'action de commande-réglage. La spécification de cette zone réside dans la réalisation concrète du calcul de régulation avec une description explicite des constituants de base et de leurs liaisons. Une construction **graphique** a été retenue pour cette réalisation. L'opération de spécification revient ainsi à l'assemblage des fonctions élémentaires de base par l'intermédiaire de liens entre leurs bornes d'entrée et de sortie. Cette construction permet d'obtenir un bloc de fonctions standard appelé **Module de Base de Traitement (MBT)** ou un bloc plus spécifique appelé **Module Spécifique de Traitement (MST)**.

La zone de commande-réglage reprend les mêmes principes que la zone d'acquisition à la différence qu'il s'agit de fonctions de post-traitement sur l'action commande-réglage. Leur rôle principal est celui d'un commutateur automatique/manuel entre la valeur de la variable d'entrée (donc provenant de la zone de traitement) et de celle du poste de conduite par modification manuelle de l'opérateur.

L'obtention finale d'une boucle de commande se réalise par assemblage, à l'aide d'un outil graphique, des blocs de fonctions définis au cours des trois zones de spécification. Le

Module de Spécifique Elaboré (MSE) résultant se définit selon le schéma fonctionnel suivant :

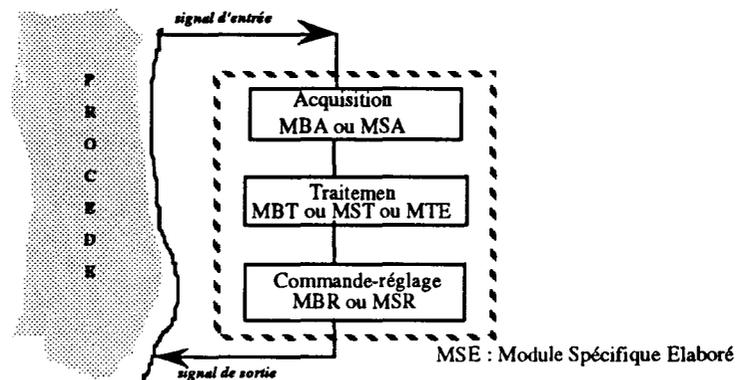


fig 3.7 : Schéma fonctionnel d'une boucle de commande.

III.3.1.3.2 - Les Objets de spécification d'un MBA et MBR.

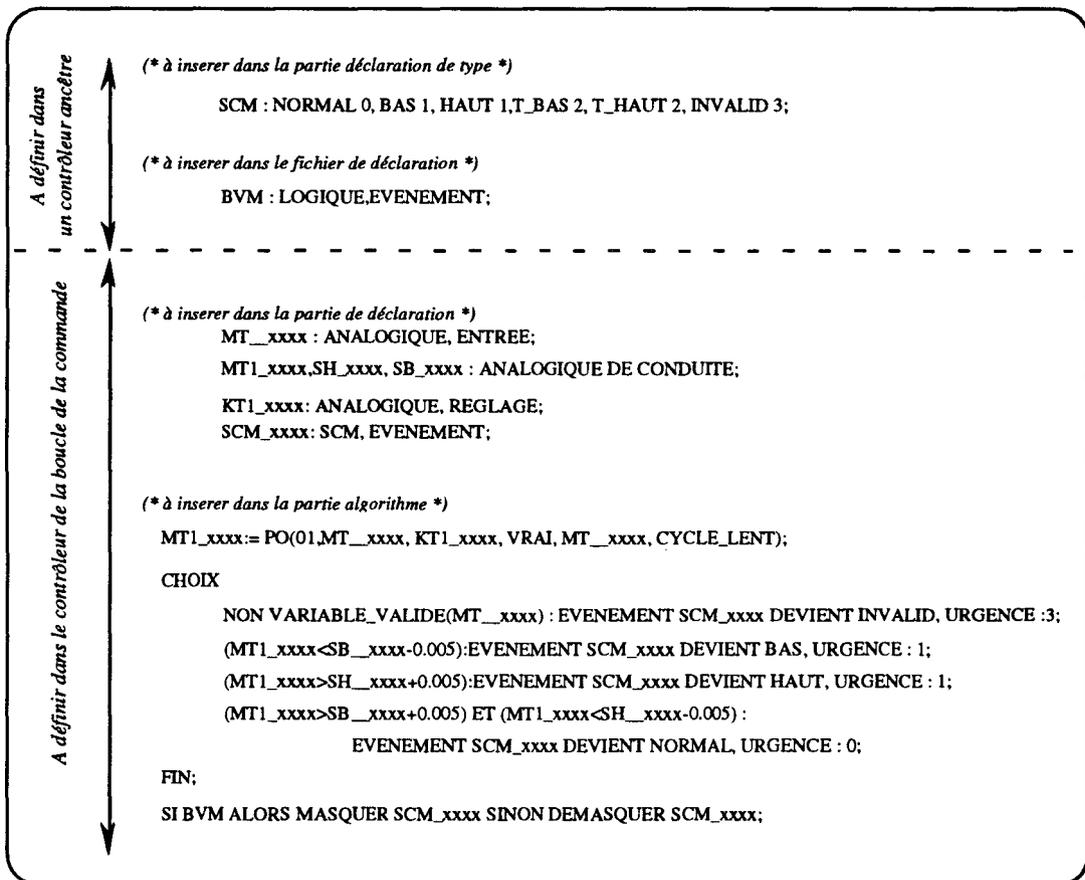
Un module de base d'acquisition représente la configuration complète de primitives ARC de prétraitement des signaux provenant d'un capteur. La spécification consiste à sélectionner de cette configuration de base la liste d'opérations à appliquer aux signaux d'entrée. Cette configuration comporte les primitives ARC suivantes :

- fonction **VARIABLE_VALIDE()**. Le drapeau de validité du signal procédé (un repère d'étude) est testé par cet opérateur. Le résultat affecte une variable d'événement et la valeur d'urgence associée.
- fonction **FILTRE** de 1^{er} Ordre PO(). La sélection de cette fonction (confirmée par la saisie du symbole "X") indique l'application de l'opération de filtrage sur la variable repère d'étude.
- fonction **LINEA** (fonction de linéarisation) ou fonction **RACINE** (fonction de racine carré). La sélection d'une de ces deux opérations définit la fonction à appliquer au signal d'entrée.
- fonction de contrôle **DETECTION DE SEUILS**. La spécification du nombre de seuils est à définir ici. La saisie peut être :
 - * rien symbolisé par "-",
 - * 2 seuils : SB (Seuil Bas) et SH(Seuil Haut),
 - * 4 seuils : STB(Seuil Très Bas), SB, SH, STH(Seuil Très Haut).

Exemple de module de base d'acquisition et fichier d'instructions ARC associées.

Module de base d'acquisition	VALIDATION SIGNAL	FILTRE	RACINE LINEA	DETECTION SEUILS
MBA001	AM	X	-	2

Tableau de définition d'un MBA : exemple MBA001.



Lignes d'instructions ARC à variables non instanciées associées au MBA001.

Pour la commande-réglage, l'opération de spécification revient à renseigner la fonction ARC de commutation MANUELLE() sur :

- le type de forçage, qui peut être :
 - * **PER**manent,
 - * **IMP**ulsionnel,

* "-" rien.

- l'état de forçage qui peut prendre l'une des valeurs suivantes :

- * Automatique,
- * Manuel.

- la valeur de forçage.

Exemple de configuration de MBT et instructions ARC à variables non instanciées associées.

Module de base de commande-réglage	FORCAGE		
	TYPE	VALEUR	ETAT
MBR001	IMP	DEV	M

Tableau de définition d'un MBR : exemple MBR001.

A définir dans le contrôleur de la boucle de la commande

(* à insérer dans la partie de déclaration *)

```
VN_#### : ANALOGIQUE, REGLAGE;
VNI_#### : ANALOGIQUE, SORTIE;
BCA: MANU_AUTO, CONDUITE;
```

(* à insérer dans la partie algorithme *)

```
VN_####:= MANUELLE(VNI_####, VN_####, BCA);
VNI_####:= VN_####;
```

Lignes d'instructions ARC à variables non instanciées associées.

Assistance et Aide proposées.

L'assistance apportée par l'outil dans la spécification des MBT et MBR se résume par l'application des règles propositionnelles de saisie de module de base. Ces règles sont de la forme :

- | | | |
|----|----------------------------------|----|
| SI | nature_E/S == "une_chaine" | ET |
| | type_E/S == "serie_de_caractère" | ET |
| | type_signal == "IPxyz" | ET |

```
type_IP == "IPuvw"           ET
ALORS proposer le module de base "MBxyzv";
```

Exemple :

```
nature d'E/S == "HN"       ET
type d'E/S == "MA"        ET
type de signal == "4-20mA" ET
type d'IP == "IP103"
alors proposer le module = "MBA001".
```

L'adaptation d'un module de base proposé par l'outil afin de satisfaire un besoin particulier est assistée par une fenêtre affichant les attributs possibles. L'enregistrement du module spécifique créé est précédé d'un test de cohérence avec la base de données procédés et système déjà acquises.

III.3.1.3.3 - Construction des modules MBT ou MST.;

La spécification de l'algorithme de calcul pour obtenir l'action de commande-réglage à partir des mesures prétraitées est à effectuer dans cette partie avec un langage graphique. Nous allons définir les éléments constitutifs de ce langage et les règles qui leur sont imposées.

Son vocabulaire.

Deux objets graphiques constituent le vocabulaire de ce langage :

- les **blocs** élémentaires ou composés qui représentent les fonctions nécessaires à l'élaboration d'un algorithme. Chaque type de blocs possède un certain nombre de bornes d'entrées et de sorties qui lui permettent de communiquer avec les autres. Nous avons distingué principalement deux classes de blocs :

a - blocs de la bibliothèque "système". Ce sont des opérateurs et des primitives simples et classiques du langage ARC tels que :

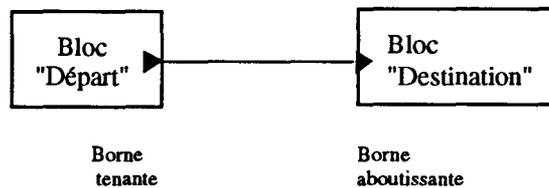
* PIDA (fonction de régulation PID), CONV (fonction de conversion d'échelle, CONS (fonction de génération de consigne), etc .

* macro-primitives, association de primitives interconnectées utilisées ensemble. Exemple CONS + PIDA.

Les contenus de cette bibliothèque ne sont pas modifiables par l'utilisateur et restent communs à toutes les applications.

b - blocs de la bibliothèque "utilisateur". Ces blocs représentent des fonctions évoluées qui ont été construites à partir des éléments de la bibliothèque système et utilisateur. Ils sont stockés dans un but de réutilisation.

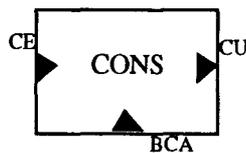
- **liaisons inter-bloc.** Les différents blocs sont reliés par des arcs orientés dans le sens : borne de sortie vers borne d'entrée. Un arc matérialise ainsi une opération d'affectation de la valeur de la borne de sortie à la valeur de la borne d'entrée.



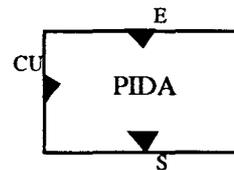
Représentation graphique.

Un bloc se présente sous une forme rectangulaire étiquetée par un nom. Les bornes d'entrées et de sorties sont disposées sur le contour du bloc et portent leur symboles d'identification. La taille graphique d'un bloc peut être fixe ou variable selon l'espace disponible.

Exemples :



Bloc de fonction CONSIGNE.



Bloc de fonction PIDA.

Quatre orientations sont possibles pour représenter un arc de liaison :

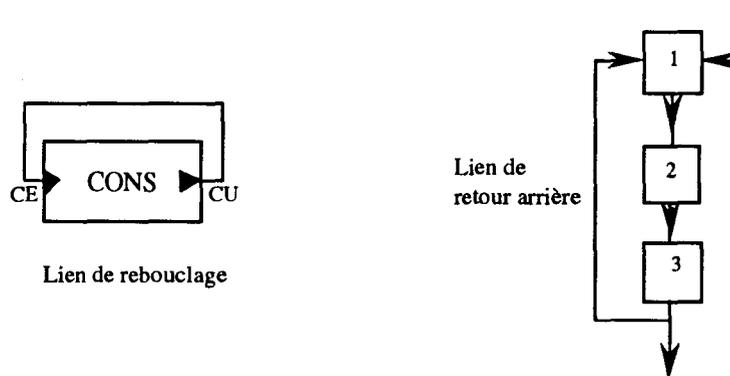


Règles syntaxiques de construction.

La règle primordiale à imposer pendant une construction est le sens de l'arc reliant deux blocs : il doit impérativement partir d'une borne de sortie d'un bloc "départ" et aller vers une borne d'entrée d'un bloc "destination".

Le bouclage que nous définissons par un arc partant d'une borne de sortie vers une borne d'entrée du même bloc est permis. Il est interprété par une affectation avec un retard d'un temps de cycle de scrutation de la machine.

Le retour arrière que nous définissons par un arc partant d'un bloc "aval" vers un bloc "amont" selon l'ordre de prise en compte des blocs est possible. Il est interprété de la même manière que le bouclage.



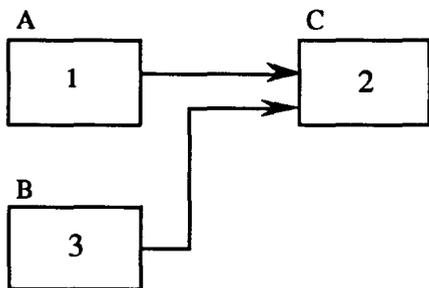
L'assistance de l'outil reste présente dans cette phase pour limiter le risque d'erreur.

Règles sémantiques d'interprétation.

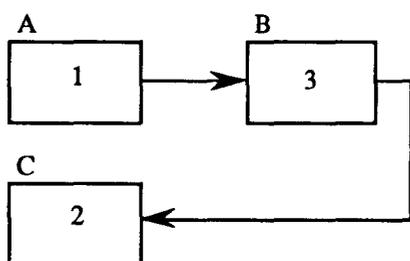
L'interprétation de l'ordre de prise en compte des blocs conditionne fortement le sens de l'algorithme spécifié par un tel langage. En effet, il est indispensable d'éviter d'introduire des retards artificiels et déstabilisateurs. Deux possibilités d'interprétation [COLL85] se présentent :

- a - interprétation horizontale (par exemple de la gauche vers la droite) puis verticale (descendante),
- b - interprétation verticale (descendante) puis horizontale.

Chacune de ces solutions présente leur faiblesse comme le montre les cas de figures suivants :



Une interprétation horizontale puis verticale établit le séquençement 1 (A), 2(C), 3(B). Ce qui se traduit par un retard d'un temps de cycle pour la prise en compte du bloc B.



Une interprétation verticale puis horizontale amène une exécution suivant l'ordre 1(A), 2(C), 3(B); ce qui ne correspond pas au séquençement voulu.

Le compromis qui a été retenu pour notre langage tient compte des deux cas suivants :

- par défaut, une association de blocs est interprétée en horizontal d'abord puis en vertical descendante. Celle-ci a été adoptée pour une raison pratique concernant la construction des chaînes simples et linéaires de blocs qui doivent normalement être disposés dans le sens vertical descendant.
- l'ordre de séquençement des blocs constitutifs d'un module de traitement complexe est défini par l'opérateur. Cette opération, bien que jugée lourde, enlève toute ambiguïté d'interprétation pour la procédure génération de code.

III.3.1.3.4 - Spécification des valeurs d'initialisation.

La saisie des valeurs d'initialisation est nécessaire pour un certain nombre de blocs de fonctions à paramètres de la bibliothèque système. Ces blocs effectuent des calculs dont le résultat dépend non seulement de la valeur des variables d'entrée, mais également d'un certain nombre de paramètres. Ces paramètres sont spécifiques à chaque type de blocs. Leurs valeurs sont à définir dans cette phase de construction de module de traitement.

Exemple : Le bloc PIDA, représentation graphique de la fonction PIDA(n, mesure, consigne, KP, KI, KD, KG, LG, LH, BW, BM, BCR, CYCLE_LENT);

Les paramètres dont les valeurs par défaut à définir sont :

KP : coefficient de l'action proportionnelle.

KI : coefficient de l'action intégrale.

KD : coefficient de l'action dérivée.

KG : gain transitoire de dérivée.

LH : limite haute de la variable de résultat.

KB : limite basse de la variable résultat.

Ces informations sont destinées à constituer le fichier de configuration des valeurs d'init (voir fig 3.2.a).

III.3.2 - Procédure de génération de codes ARC.

Cette procédure constitue la partie terminale de l'outil OPERA. Elle exploite les spécifications acquises lors des procédures de saisie et de construction précédentes.

L'élaboration d'un fichier texte d'un contrôleur qui est, par définition (voir § III.3.2.2) composé d'une partie Déclaration et d'une partie Algorithme, utilise un certain nombre de lignes d'instructions ARC à variables non instanciées associé à chaque bloc de la bibliothèque système. Ces lignes d'instructions ont été préalablement définies dans une base de données de primitives ARC. Cette ressource fournit dans ce sens les lignes d'instructions élémentaires pour former les deux parties d'un programme contrôleur.

L'ordre d'écriture effective des lignes d'instructions de la partie algorithme est obtenu selon la séquence suivante :

(* partie algorithme contrôleur *)

1 - Partie Algorithme du Module d'Acquisition

2 - Partie Algorithme du Module de Traitement

3 - Partie Algorithme du Module Commande-Réglage



L'écriture de la partie algorithme du module de traitement est obtenue par agencement des lignes associées à chaque bloc constitutif selon l'ordre de prise en compte imposé par la sémantique défini au § III.3.1.3.3. La relation entre les variables des fonctions de calcul est établie en fonction l'existence ou non de liens via les bornes des blocs représentatifs.

L'obtention d'un programme ARC spécifique à un contrôleur donné résulte de l'**estampillage** des variables non instanciées des lignes d'instructions par les symboles des repères d'étude affectés à ce contrôleur.

III.4 - PRESENTATION DE L'OUTIL OPERA

Cette partie décrit l'outil logiciel que nous avons développé dans le cadre du contrat APC entre notre laboratoire et la Division Contrôle Bailey de la société CEGELEC. La maquette a été réalisée sur une plate-forme matérielle et logicielle répondant aux besoins de la spécification faite précédemment et au critère d'évolutivité exigé.

Une station de travail Vax3100 sous VMS a été retenue comme plate-forme de développement pour une raison de compatibilité avec le parc machine de la société.

Le souci de proposer un environnement de travail convivial et ergonomique a déterminé notre choix sur l'utilisation des primitives graphiques de DecWindows [DECW88], de XLIB [NYE88], de GKS [GKS88] pour développer l'interface graphique de l'outil.

Le besoin en volume et en matière de sécurité de données nous a conduits à opter pour un logiciel de gestion de base de données. En tenant compte du choix matériel, Vax/Rdb[RDB88] présentait les fonctionnalités requises. D'autre part, il offre la possibilité d'utiliser le langage standard de requêtes de base de données SQL [VaxSQL] que l'on peut aisément interfacer avec les langages classiques de programmation utilisés dans l'industrie : le C et Pascal.

III.4.1 - Structure générale

Lors de l'appel de l'outil, est activé un **menu principal** (fig 3.9) dont les options sont les suivantes :

- * PI - Identification d'une Affaire.
- * PA - Description Procédé.
- * PB - Organisation Système.
- * PC - Génération Module
- * PD - Génération de programmes contrôleurs.
- * Quitter OPERA.

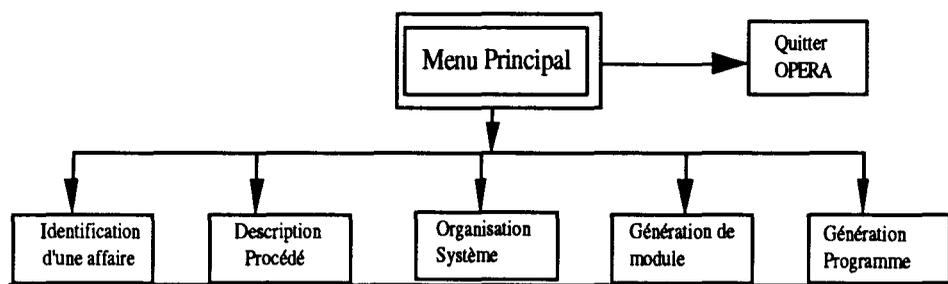


fig 3.9 - Options du menu principal.

Toute application traitée par OPERA se rapporte à une affaire client identifiée par le nom d'un contrat établi entre un acheteur (le client) et le vendeur (le fournisseur de système). L'étiquette d'identification qui doit figurer sur toute opération de traitement comporte :

- le titre du projet,
- les raisons sociales,
- et les références de commande Acheteur-Vendeur.

La création ou la sélection d'une affaire client existante dans la procédure "PI : Identification d'une affaire" permet alors l'accès aux autres options.

III.4.2 - Présentation de la procédure "PA - Description procédé".

Les opérations de description procédé sont regroupées selon l'organigramme suivant :

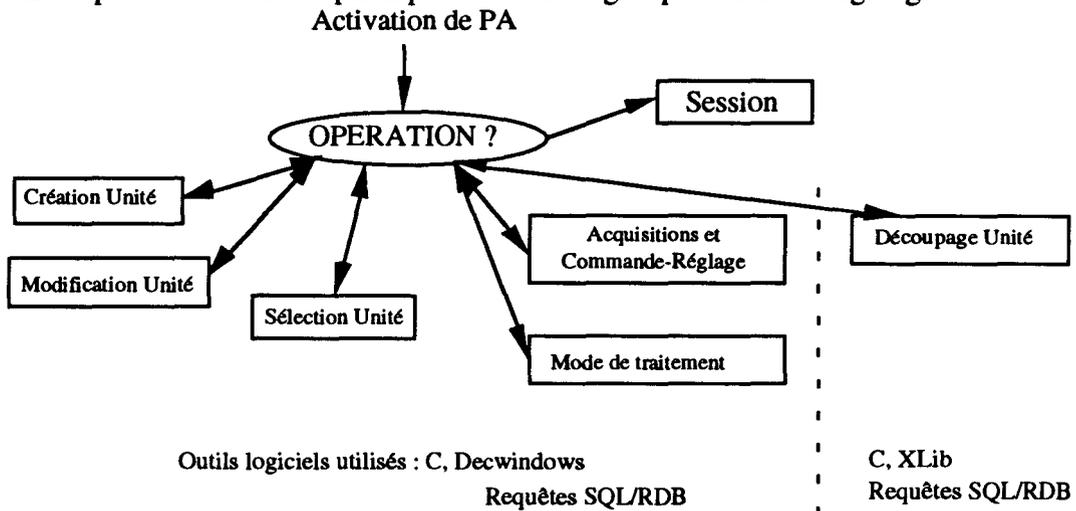


fig 3.10 - Structure de PA.

L'option PA ouvre sur un menu d'opérations de description d'une unité. Ces opérations sont affichées sur une barre à menus déroulant (fig 3.11) :

- "Aide" pour avoir des explications en ligne,
- "session" pour quitter cette procédure et revenir sur le menu principal.
- "opérations" propose la liste d'opérations suivantes :
 - * création d'une unité,
 - * sélection d'une unité de travail,
 - * découpage d'une unité sélectionnée,
 - * saisie de pages de renseignements offre deux possibilités :
 - ** "Acquisitions et Commande-Réglage",
 - ** "saisie de commentaires de traitement".

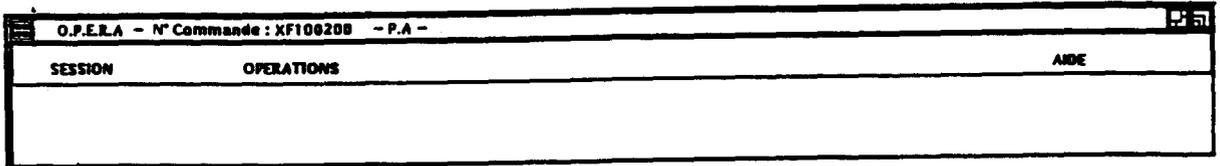


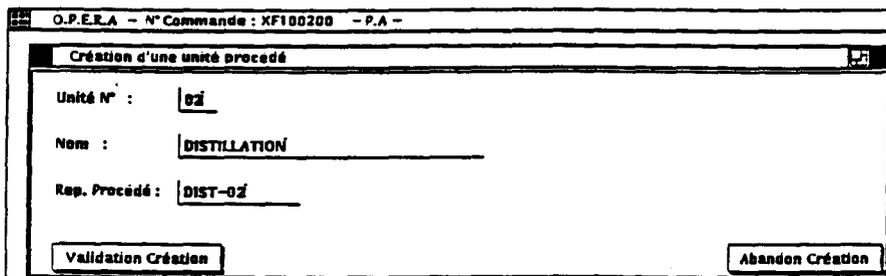
fig 3.11 - Barre de menu d'accueil de PA.

- Découpage d'une unité sélectionnée.

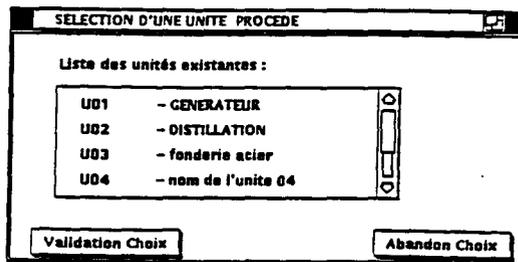
Le choix au préalable d'une unité existante donne l'accès à cette opération. L'unité se présente d'entrée sous forme d'un rectangle étiqueté par son numéro. Elle est renseignée par une fenêtre en bas de page. Les instruments de découpage et de mise au point sont les fonctions de création, modification, suppression d'une entité et l'affichage de l'arborescence.

Exemples d'images écran.

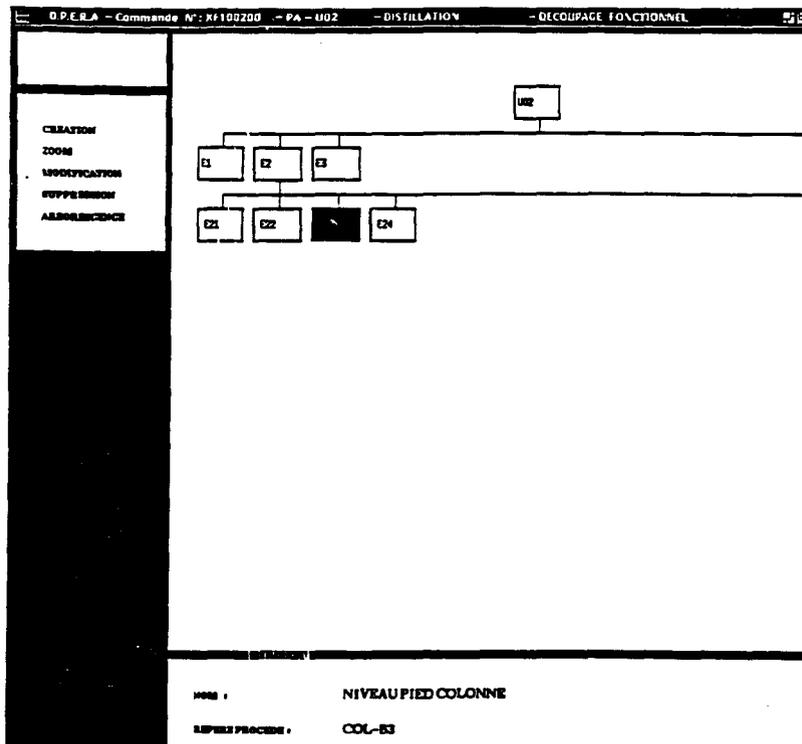
a - Création d'une unité



a - Sélection d'une unité de procédé.



b - Découpage de l'unité de distillation.



- Acquisition et Commande-Réglage.

La saisie des définitions des signaux d'entrées et sorties commence par la désignation de l'entité qui va les contenir. Le bouton poussoir "Liste des entités" (fig 3.12) affiche toutes les entités créées lors du découpage de l'unité.

Le bouton poussoir "itérations" permet de créer ou de rappeler un repère d'étude sur une ligne de saisie dont le remplissage est assisté par les fonctions d'aide de "Restitution" et "Copie" d'une ligne de repère d'étude déjà existante.

Les boutons "Haut" et "Bas" permet de faire défiler les lignes de repère d'étude contenues dans une entité choisie.

N° ligne	Rep Entite	Rep Etude	Rep Client	Libelle	Ech Precede	Unite Phys	Nature	Type	Autres
1	E23	LV101	LV101	NIVEAU_PIED	?	M	HN	v	FFFF
2	E23	LV101	LV101	COMMANDE	?	M	CA	-	COMM ANALOG

fig 3.12 - Saisie des définitions des repères d'étude.

L'option **TRAITEMENT** se comporte dans cette procédure comme un traitement de texte pour saisir les commentaires concernant le type et mode d'algorithme de régulation à construire lors de la procédure de Génération de Module (PC).

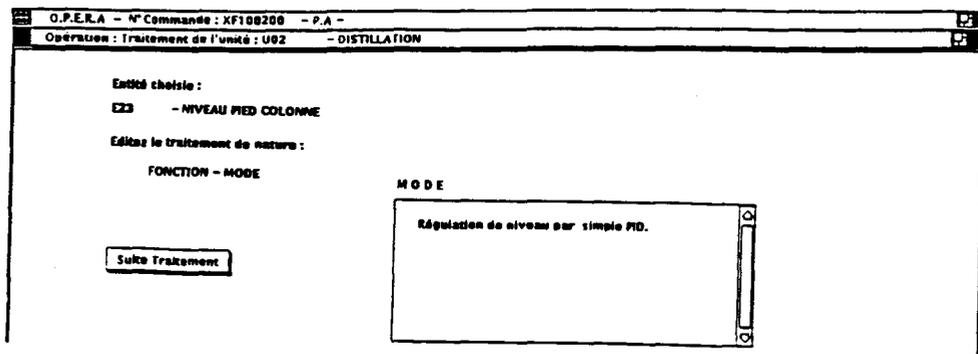


fig 3.13 - Fenêtre de saisie des commentaires de traitement.

III.4.3 - Présentation de la procédure "PB - Organisation système".

Le découpage d'une unité en entités fonctionnelles au cours de la procédure précédente fournit l'ossature structurelle d'automate exploitée par cette option. Son activation présente, de manière analogue à PA, un menu à barre (fig 3.14) proposant les opérations sur automate suivantes :

- Session pour quitter cette procédure et de revenir sur le menu principal,
- Sélection d'un automate,
- Découpage d'un automate,
- Affectation Entrée/Sortie - Contrôleurs
- Saisie de page de renseignement qui conduit sur deux possibilités :
 - * Saisie des Acquisitions - Commande-Réglage.
 - * Visualisation des signaux d'E/S à traiter.

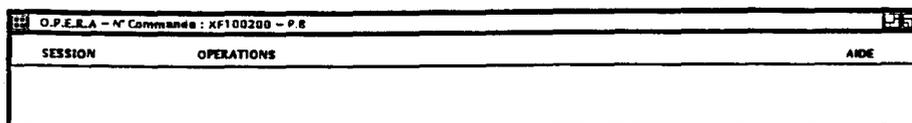


fig 3.14a - Barre de menu d'accueil de PB.

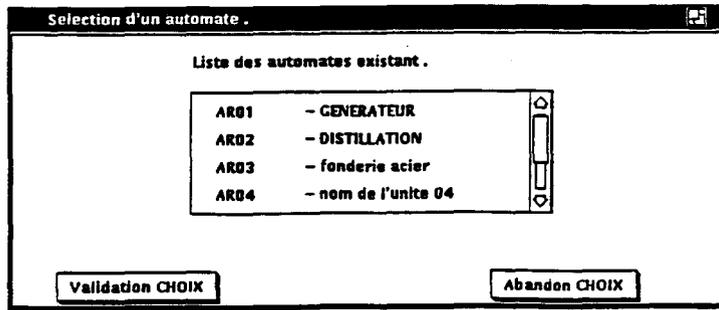


fig 3.14b - Image écran de sélection d'un automate.

L'opération "Découpage d'un automate" affiche, pour l'automate choisi, l'arbre des contrôleurs traduite de l'arborescence d'entités de l'unité correspondante. L'affinage de la structure d'automate permet d'ajouter un niveau supplémentaire de contrôleurs et de répartir les repères d'étude des contrôleurs père vers les contrôleurs fils terminaux.

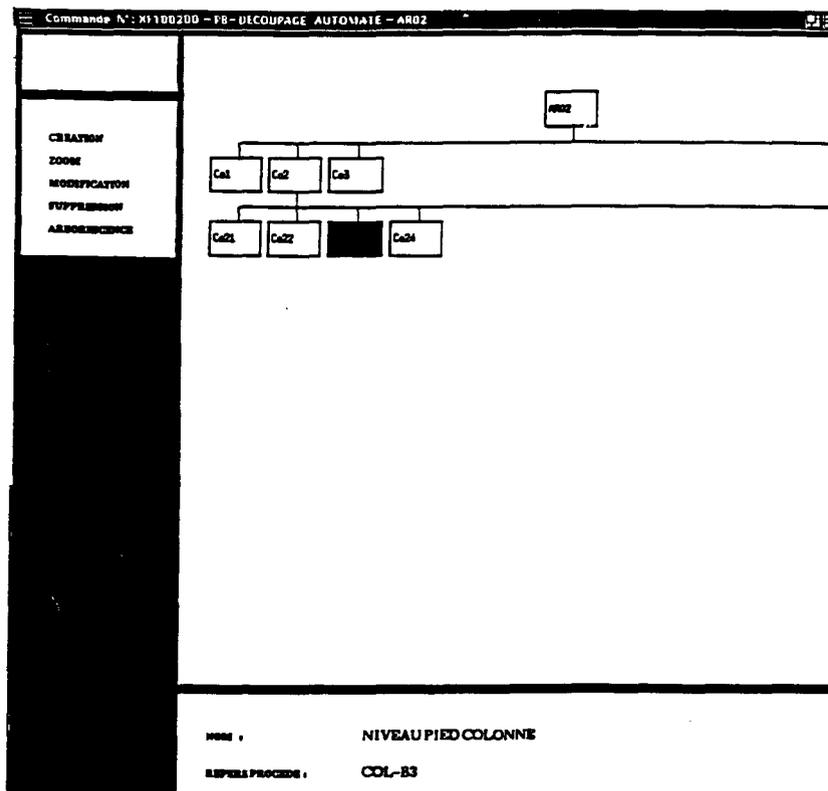


fig 3.15 - Structure automate héritée de PA.

L'opération "Acquisitions - Commande-Réglage" permet d'enrichir les définitions des repères d'étude sur les caractéristiques des cartes Interfaces Procédé (IP) et leur implantation.

N° LIGNE	Ech IP	Type Signal	Type IP	Rep Coo	N° Vole	Rep Vole	Alim Capteur	Compensation Soudure Fr	Repli	Surv Ligne	Rep Coo IP Secours
1-LT101	-HN -V	1?	103	1?	1?	1??	1??	1///	1////	1///	1///
2-LV101	-CA	14-20	100	1?	1?	1?	1///	1///	1?	1///	1?

fig 3.16 - Identification des IPs.

L'option "Traitement" est une opération de visualisation des repères d'études par classification en signaux d'entrées et de sortie de la boucle de commande.

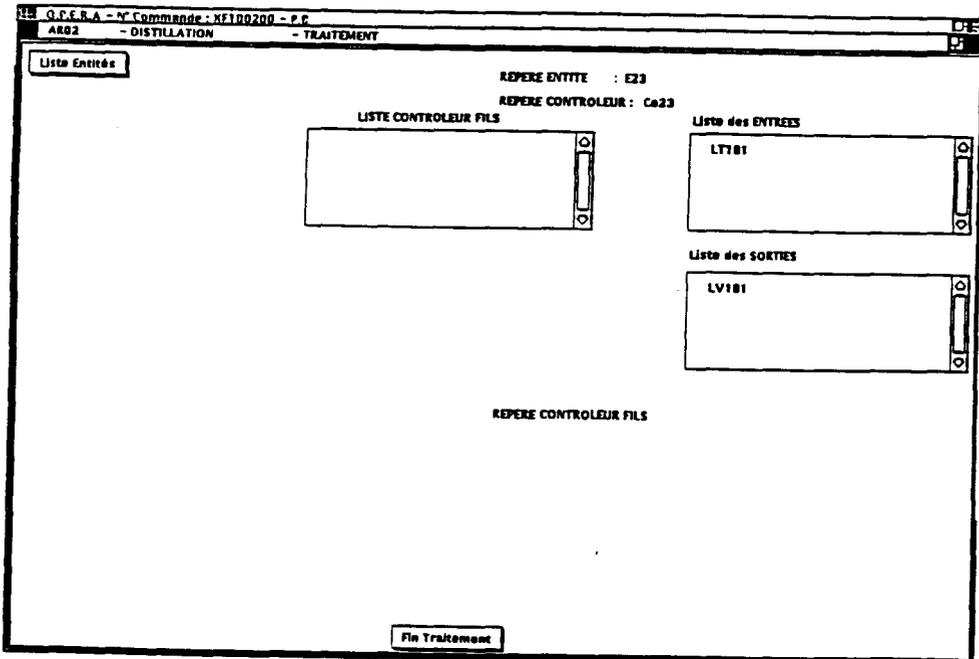


fig 3.17 - Classification en signaux d'entrée et sortie des repères d'étude.

III.4.4 - Présentation de la procédure "PC - Génération de Modules".

Cette procédure complète et termine l'acquisition des spécifications en saisissant des fonctions de traitement des signaux d'E/S et l'algorithme de calculs des actions de réglage. Cette acquisition est regroupée en deux opérations :

- saisie des fonctions de traitement des signaux d'entrée et des signaux de réglage.
- élaboration graphique et chaînage des modules de calcul de régulation d'une boucle de commande.

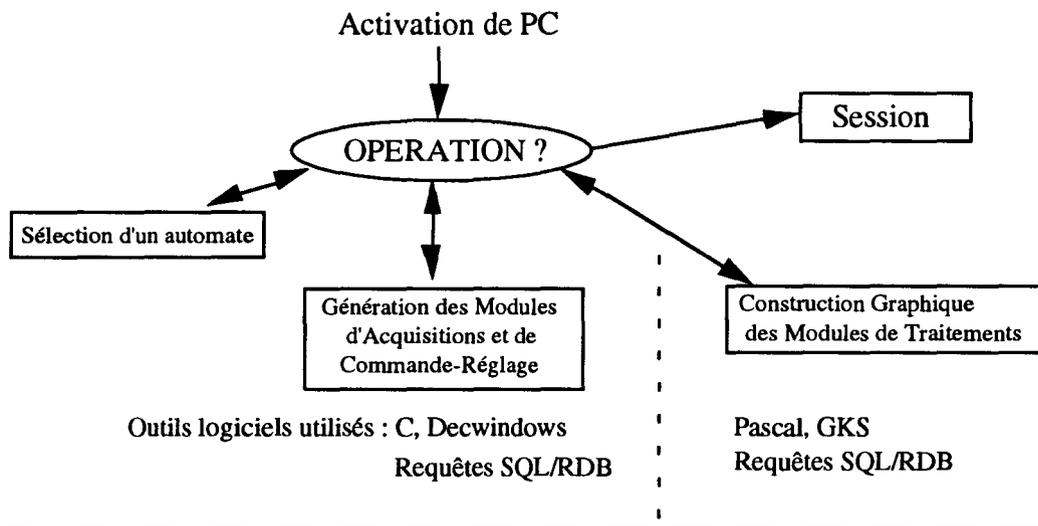


fig 3.18 - Structure de la procédure PC.

Un menu d'accueil est activé à l'entrée de cette procédure et propose les opérations suivantes :

- "session" pour quitter la procédure PC.
- "opérations" de sélection d'automate de travail.
 - * de "saisie des modules d'acquisition et de commande-réglage".
 - * de "saisie de module de traitement".

L'opération de **saisie des modules d'acquisition et commande-réglage** consiste tout d'abord à sélectionner le contrôleur contenant les signaux d'E/S. Le bouton poussoir "liste Contrôleurs" (voir fig 3.18a) permet de choisir un contrôleur de travail et de visualiser, par la même occasion, les lignes de définition de repère d'étude. La colonne "Module" doit contenir la référence d'une configuration de primitives de prétraitement ou de post-traitement à opérer sur le signal identifié par le repère d'étude.

The screenshot shows a window titled "O.P.E.R.A - N° Commande : X1102000 - P.C. - GENERATION DE MODULES". Below the title bar, there is a menu bar with "ACQUISITION-COMMANDE-REGLAGE". The main area contains several buttons: "Liste Contrôleurs", "Saisie Ligne", "Restoration", and "Copie". Below these buttons, there is a sub-header "Co23 - NIVEAU PIED COLONNE". The main data area is a table with the following columns: "N° Ligne", "Rep Etude", "Acq-Nature", "Acq-Type", "Type Signal", "Type IP", and "MODULE". The table contains two rows of data:

N° Ligne	Rep Etude	Acq-Nature	Acq-Type	Type Signal	Type IP	MODULE
1	L7701	HN	V	1	103	
2	L7101	CA	-	4-20	100	

At the bottom of the window, there are buttons for "Fin ACQUISITION-CDE REGLAGE" and "Abandon ACQUISITION-CDE REGLAGE".

fig 3.18a - tableau de saisie du module d'acquisition et commande-réglage.

L'opération d'élaboration graphique et de chaînage des modules de traitement de la boucle de commande présente à l'utilisateur un éditeur graphique. Il peut effectuer deux sortes de construction de blocs :

- a - construction de blocs évolués à l'aide des éléments de la bibliothèque système. Ces blocs sont anonymes dans le sens où ils peuvent être rappelés pour faciliter la construction des blocs modules de traitement d'une boucle de commande.
- b - construction de la boucle complète de commande par assemblage au moyen des liens les trois blocs représentant les trois zones d'une boucle de commande. Cette opération n'est possible qu'après avoir sélectionné le nom du contrôleur qui va exécuter réellement l'algorithme de traitement.

L'opération de construction d'un bloc quelconque revient alors disposer les blocs constitutifs sur l'éditeur graphique, et tracer via leurs bornes d'entrée et sorties les liens nécessaires. Elle se termine par une numérotation du bloc de traitement créé et par un rangement dans une bibliothèque utilisateur.

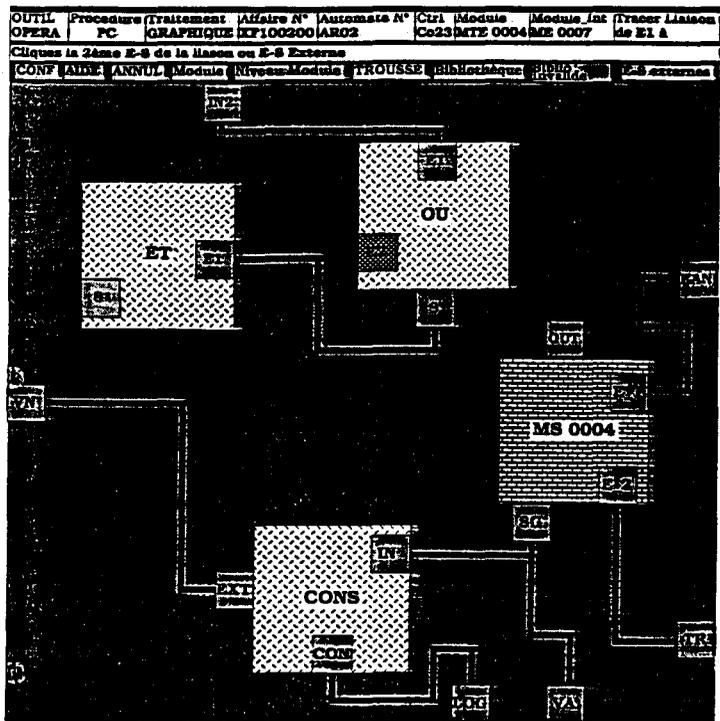


fig 3.18b - Image de construction d'un bloc de traitement évolué.

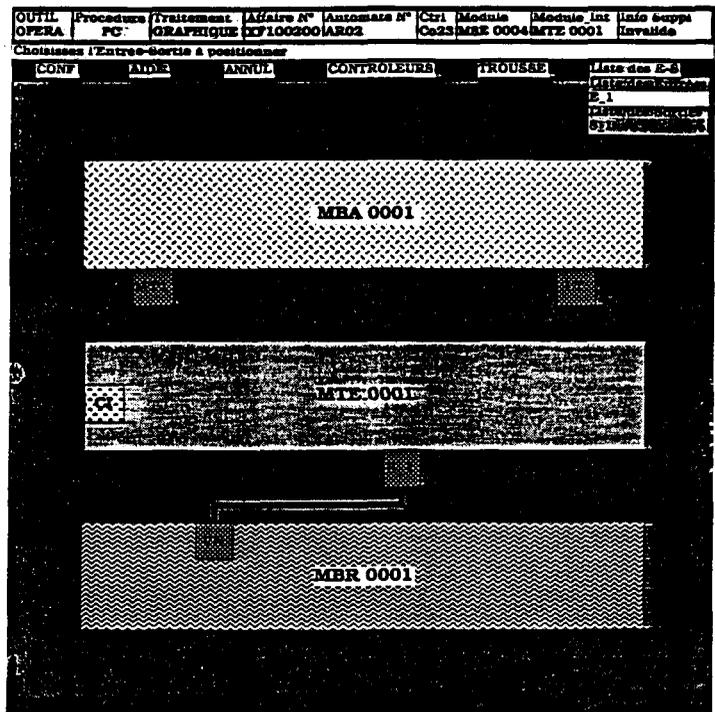


fig 3.18c - Image de construction d'un bloc MSE.

III.4.6 - CONCLUSION SUR L'OUTIL OPERA

Ce projet de réalisation d'un outil de type CAO a été engagé dans l'objectif d'effectuer une étude de faisabilité de l'assistance au développement et à la production d'automatisme. Son application a été limitée aux automatismes continus de type boucle de régulation. L'apport de qualité pour améliorer la démarche actuelle de réalisation d'une affaire client s'est porté particulièrement sur les trois points suivant :

- une **assistance** permanente dans chaque phase d'acquisition de données. Elle résulte de la synthèse puis de la mise en bibliothèque des expériences et du savoir-faire du concepteur. Toutefois, cette aide n'est pas contraignante et donne la possibilité de traiter les cas spécifiques.
- une **vérification** systématique de la **cohérence** des informations fournies par l'utilisateur.
- une **automatisation de la production des codes** automates en s'appuyant sur les données de spécifications du procédé.

L'évolution de cette maquette vers un outil de dimension industrielle (prise en compte des automatismes logiques combinatoires et séquentiels) devrait s'effectuer sans poser de difficultés d'intégration pour les raisons suivants :

- le choix d'outil logiciels standards pour le développement.
- l'utilisation du concept de "bibliothèque" pour implanter les règles de saisie, de propositions et de définitions des primitives ARC. Ces bibliothèques peuvent être enrichies pour élargir le champ d'application de l'outil.
- l'utilisation du concept de "procédure". Le regroupement des opérations en procédure selon leur fonction rend l'outil modulaire. Une procédure de saisie d'une nouvelle fonction d'automatisme s'intègre facilement dans la structure générale de l'outil.

Une méthode de développement est également véhiculée par cet outil. Cette méthode applique une approche structurée et progressive :

- 1 - Description du procédé par des critères fonctionnels et de contrôle-commande.**
- 2 - Description des moyens matériels et de leur implantation.**
- 3 - Description des fonctions et modules de traitement de régulation.**

Le respect de cet ordre de spécification favorise la génération des codes automates dans la dernière étape de génération de programme contrôleur.

Cette méthode a pour souci de rendre la démarche indépendante de la technologie de la machine cible. Cette qualité s'appuie essentiellement sur la mise en avant de la spécification fonctionnelle du P.C.F et la vérification systématique de complétude et de cohérence sur les

données acquises. Les caractéristiques à aspect propriétaire ont été prises en compte en dernier lieu lors de la phase finale de génération d'automatisme.

III.5 - CONCLUSION SUR LE LANGAGE ARC ET SYSTEMES DIS-CONTINUS

Ce développement autour du langage ARC nous a permis de caractériser une première structure de commande des systèmes dis-continus identifiée au niveau partie commande d'une unité de production. En effet, ce langage présente les caractéristiques d'un langage de spécification mixte d'automatisme événementiel et continu.

La commande de nature événementielle est décrite à l'aide des instructions de structure de graphe suivantes :

PAS *nom_du_pas* ;

(* liste des actions à effectuer *) .

SUITE *nom_du_pas1* **QUAND** *réceptivité_1* ,
 -----,
nom_du_pasn **QUAND** *réceptivité_n* ;

L'automatisme événementiel est développé dans les contrôleurs de type **séquentiel**. Leur exécution par la machine virtuelle de l'automate se distingue par l'exécution uniquement des instructions contenues dans le pas actif et l'évaluation des conditions de réceptivité associées.

Le même langage permet aussi de décrire les automatismes de nature continue par des primitives temporelles de régulation et de primitives mathématiques telles que PID, avance, retard, fonction de linéarisation, fonction rampe, RM1 et RM2 (régulation par modèle interne 1^{er} et 2nd ordre). Ces commandes continues sont à développer dans des contrôleurs déclarés **continu** dont les lignes d'instructions sont intégralement exécutées à chaque cycle automate.

L'interaction de ces automatismes de commande s'effectue principalement à l'aide d'une opération d'activation et désactivation des contrôleurs continus par les contrôleurs séquentiels. Par contre, les réceptivités (événements d'évolution) des automatismes séquentiels peuvent comporter des conditions sur l'état des grandeurs à régler, sur les valeurs des alarmes.

Ces types d'interaction peuvent être illustrés par une première forme structurelle de commande dis-continue :

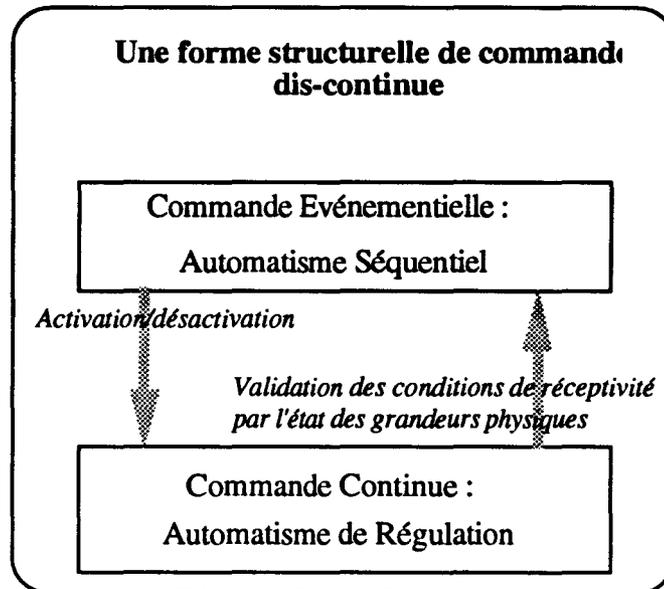


fig 3.20 - Structure de commande dis-continue identifiée dans la partie commande.

CHAPITRE IV

CHAPITRE IV

Proposition d'une Méthode de Conception des Commandes Inter-Ressources Batches.

INTRODUCTION.

Dans le chapitre II, nous avons évoqué l'idée d'une transposition de la méthodologie CASPAIM pour l'élaboration des commandes de pilotage de la préparation et de la coordination des unités physiques. Nous consacrons ce chapitre à l'étude d'une telle transposition afin d'aboutir à une démarche de conception adaptée aux caractéristiques des Systèmes de Production Flexibles Batches (SPFBs).

Nous allons définir au cours de la première partie les hypothèses et le cadre de transfert de la démarche préconisée par CASPAIM. Nous présenterons ensuite l'architecture générale de l'approche transposée.

Dans la seconde partie, nous appliquerons chaque étape de la démarche à des cas réels de fabrication flexible batch. Nous soulèverons, par la même occasion, les difficultés posées par la modélisation de la recette et de l'installation de préparation qui nécessitent une adaptation intelligente de la démarche initiale.

Les perspectives d'extension de la démarche transposée s'orientent principalement sur les outils d'aide à la conception à mettre à la disposition du concepteur et vers un type d'installation mixte composée d'un SPFB et d'un système de production de type manufacturier.

IV.1 - CONTEXTE ET HYPOTHESES DE TRANSPOSITION

IV.1 1 - CASPAIM : Contexte, Hypothèses et Objectifs

La méthodologie CASPAIM a été initialement développée pour des Systèmes de Production Flexibles (SPFs) caractérisés par les paramètres de fabrication suivants :

H1 - le produit : l'aspect d'objet physique concret à volume indéformable (un solide) est fondamental.

- H2 - le temps opératoire de chaque transformation élémentaire du produit : ce paramètre est interprété comme étant une durée finie comprise dans un intervalle de temps délimité par les événements "début opération" et "fin opération".
- H3 - la gamme de fabrication : elle ne comporte que des opérations disjointes dans le temps. Ceci exclut la possibilité de deux opérations (ou plus) traitant en même temps un même produit.
- H4 - la partie commande : elle est l'unique responsable de toute modification d'état subie par le produit. Les phénomènes perturbateurs d'origine externe n'existent pas ici.

Compte tenu de ces conditions restrictives sur le type de systèmes de fabrication, la conception de commande assistée par CASPAIM suppose également les faits suivants :

- H5 : Existence d'un niveau de planification prévisionnelle et d'ordonnancement à moyen terme qui fournit le plan de production. Ce dernier alimente en ordres de fabrication le module de commande à concevoir qui, à son tour, va les transformer en commandes effectives d'unités et de ressources de préparation.
- H6 : Existence de la partie opérative : les moyens de production et leur organisation structurelle sont considérés existants et opérationnels.

Ainsi défini l'environnement d'application, le projet CASPAIM peut se définir comme une méthode de conception du **système de pilotage et de coordination des SPFs**. Son objectif est la réalisation de l'architecture de communication entre différentes unités de contrôle/commande. Implémentée sur un ordinateur, chaque unité représente la commande locale (commande intra-ressource) du processus de traitement du produit au niveau d'une ressource. La méthode CASPAIM considère ces unités de commandes locales existantes et opérationnelles, et s'intéresse plus particulièrement à la gestion de l'ensemble de ces processus de manière cohérente vis à vis des contraintes de fabrication (respect des dates dues, disponibilité des ressources, optimisation des indicateurs de performances).

IV.1.2 - Bases de la transposition.

La transposition de l'approche CASPAIM vers une démarche de conception des commandes inter-ressources batches se justifie premièrement par l'**adéquation** entre l'objectif visé par CASPAIM (voir §IV.1) et le besoin de méthode de résolution des problèmes de coordination batch spécifiés au §II.2.3.1.2.b.

De plus, l'existence des **éléments sémantiquement équivalents** entre lesquels des concepts privilégiés dans la démarche CASPAIM peuvent être facilement transposés, renforce l'idée d'une transposition. La transposition est immédiate entre les éléments des couples suivants :

- (**produit -> lot ou batch**) : l'approche orientée produit se traduit tout naturellement en approche orientée lot.
- (**gamme -> recette**) : ces deux éléments renferment la description de la procédure de fabrication du produit brut en produit fini.

IV.1.3 - Eléments divergents et Hypothèses.

Les écueils d'une transposition directe de l'approche CASPAIM relèvent principalement des contradictions suivantes :

- *aspect fluide du lot en opposition avec l'hypothèse H1.*

Cette difficulté est levée en ayant une **vue logique** du lot physique et en associant **des moyens de fabrication** pour le localiser. Cette vue logique consiste à considérer la quantité finie de fluide subissant uniformément les transformations de la recette comme étant un objet. Cet objet est décrit par une association de structure de données et de procédure d'opérations. Son existence prend effet à l'instant du lancement de l'ordre de fabrication (événement ponctué par la constitution de la recette de lot à partir de la recette de campagne (notion de Control Recipe du modèle ISA/SP88)), et s'éteint au moment du stockage du lot préparé. Cette assimilation en objet faite par les commandes de coordination donne une vue discrète du lot physique.

- *parallélisme SEC des opérations de préparation batch en contradiction avec la disjonction des opérations d'une gamme (hypothèse H3).*

Cet aspect est levée en raisonnant sur **la notion de phase de transformation** du lot et non pas sur les opérations élémentaires dont la gestion relève du niveau des commandes locales.

- *existence des perturbations d'origine externe en contradiction avec l'hypothèse H4.*

Cette contradiction ne se pose pas au niveau coordination et pilotage qui a **une vue externe** de l'exécution des phases de transformation. Cette caractéristique des processus continus est prise en compte lors de la conception des commandes internes. Au niveau pilotage et coordination, la partie commande est l'unique responsable de tout changement de phases de préparation de lot.

En résumé, la transposée batch de l'approche CASPAIM doit s'appuyer sur les notions suivantes :

- lot logique représenté par une structure de donnée (recette de lot) donnant une image discrète du lot physique.

- séquences de phases de transformation décrivant la procédure de préparation.

IV.1.4 - Architecture globale et démarche transposée de conception

Les commandes de pilotage et de coordination des SPFBs (parties grisées) s'inscrivent dans un ensemble d'activités (fig.IV.1) plus large d'un système de supervision évolué.

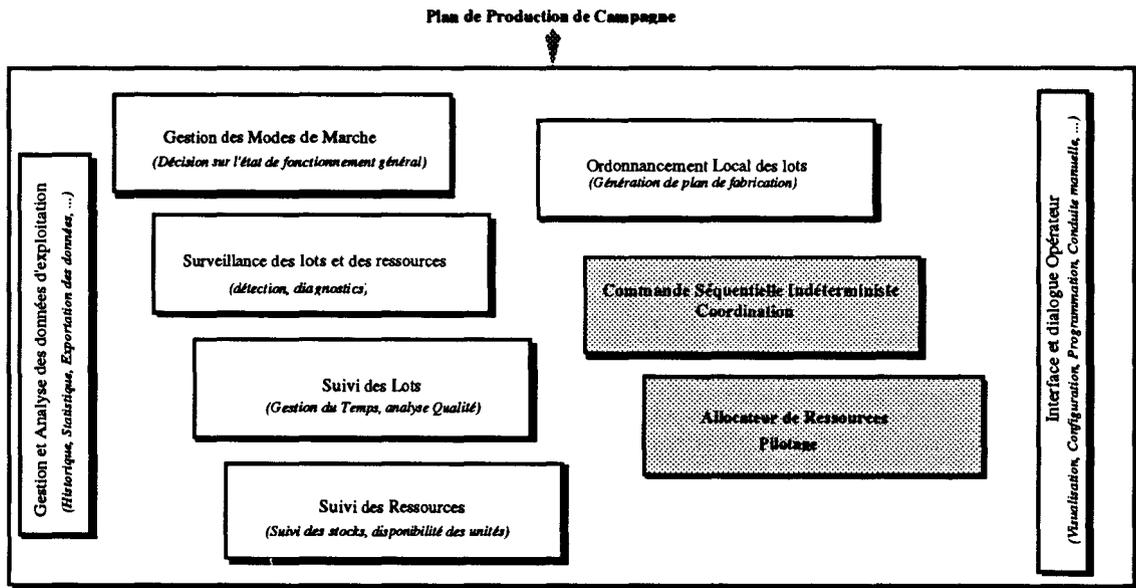


Fig.IV.1 - Schéma des principales activités d'un système de supervision évolué.

La démarche transposée de conception (fig.IV.2) est une méthode de traduction de l'ordre de fabrication de lot émanant du plan de fabrication en commandes de phases de préparation exécutables par le niveau de commandes locales d'unités et de ressources. Cette traduction commence par une première étape de spécification qui permet de formaliser **séparément** les objectifs transformationnels du lot (spécification fonctionnelle de la recette) et les moyens de production (spécification opérationnelle et structurelle de la partie physique). Deux modèles indépendants résultent alors de cette première étape.

La fusion par étapes progressives et structurées de ces deux modèles nous conduit à une étape d'analyse et de conception. Elle donne un modèle complet de la commande de coordination intégrant les mécanismes de communication avec la commande locale des unités. A ce niveau de traduction, le modèle de commande garde la flexibilité de routage (donc non déterministe) montrant les possibilités d'utiliser toutes les ressources de l'atelier de fabrication. Le modèle est aussi statique car il ne tient compte ni des événements aléatoires de fabrication ni des changements de stratégie de fonctionnement. Le formalisme de spécification peut être tout aussi bien graphique (RdP par exemple) que textuel (langage procédural orienté batch). Nous

proposons d'utiliser les Rdp Ordinaires pour rester homogène avec les outils de modélisation de CASPAIM.

Rendre ce modèle de commande dynamique et déterministe termine le processus de traduction. Ceci est concrétisé par l'affectation d'une ressource physique à une phase de préparation de la recette de lot. Cette opération finale fait appel à un niveau décisionnel que nous appelons **allocateur de ressources**.

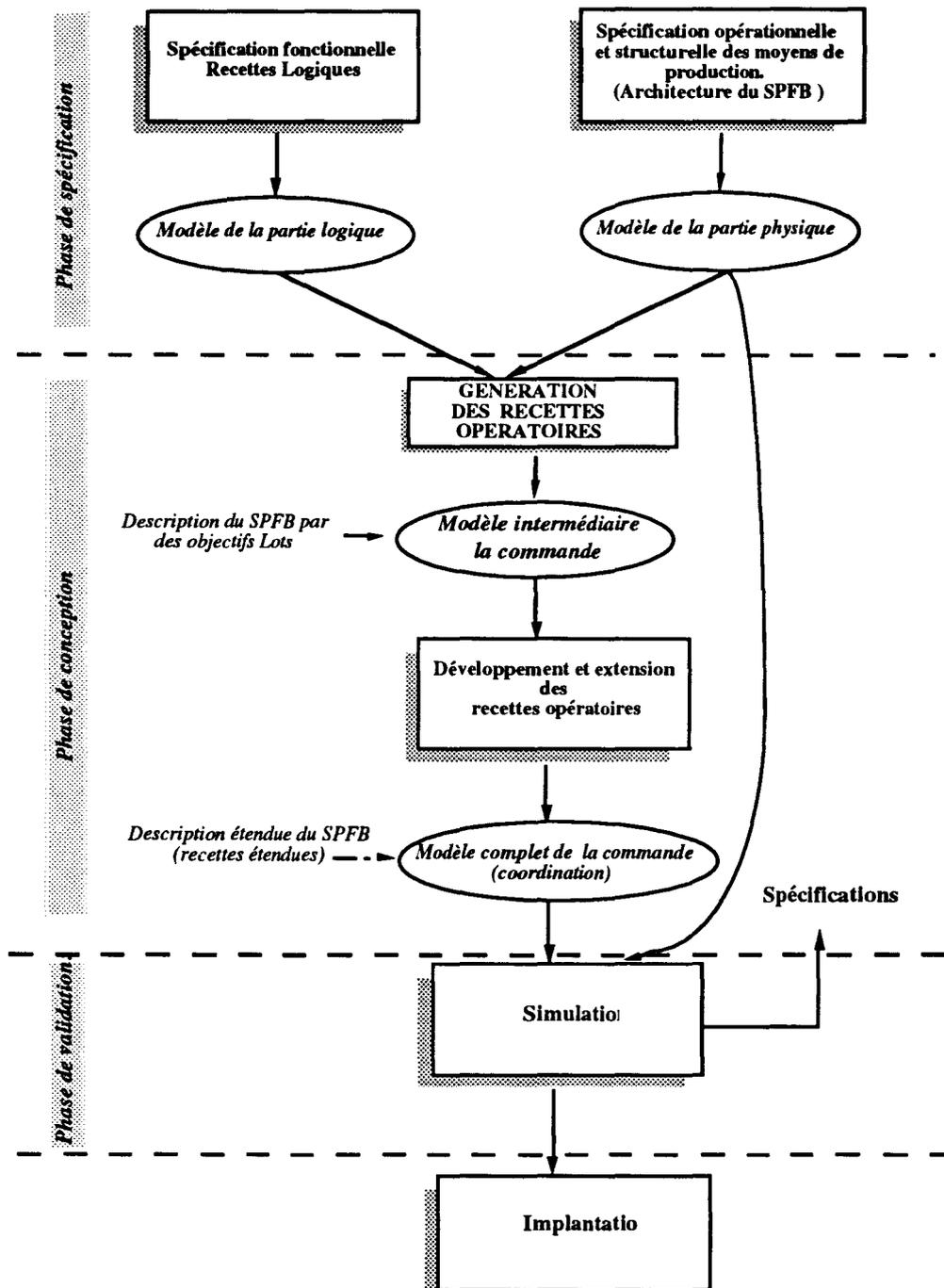


fig.IV.2 - Démarche transposée de conception.

IV.2 - PRESENTATION DETAILLEE DE LA DEMARCHE.

IV.2.1 - Phase de spécification.

L'activité de spécification met en avant la distinction entre les objectifs à atteindre (spécification fonctionnelle de la transformation du lot) et les moyens opérationnels et leur structure (spécification structurelle et opérationnelle du procédé) à commander. Ce choix montre, d'une part, la conformité de la démarche aux recommandations du G.L (la spécification n'est qu'une réponse à la question QUOI) et, d'autre part le souci d'exploiter au maximum la flexibilité potentielle du procédé.

IV.2.1.1 - Modélisation de la partie opérative.

Le but de l'analyse du procédé est avant tout d'obtenir un modèle interne des moyens de production et leur organisation structurelle. Ce modèle doit rester indépendant de toute finalité d'utilisation afin de permettre une exploitation selon des points de vue multiples en fonction de besoin des différentes activités de la fabrication (maintenance, gestion des modes de marche, surveillance, ...).

La modélisation que nous effectuons dans cette étape est dépendante de l'objectif visé qui est la conception de commande de coordination/pilotage. Du point de vue commande, la partie opérative batch peut être considérée comme étant une composition d'un ensemble de **Ressources Physiques Élémentaires (RPE)** commandables par des commandes discrètes. Nous précisons avant de définir les ressources physiques élémentaires que ces ressources sont identifiées sur les chemins principaux des lots (c'est à dire les lignes de fabrication). Les dispositifs annexes tels que les réservoirs de liquide de chauffage/refroidissement, circuit de nettoyage ou de stérilisation automatique, générateur d'énergie,... peuvent être considérés soit inclus dans les RPEs (dans ce cas leur modélisation est effectuée lors de la conception des commandes internes) ou ignorés lorsque leur contribution est indirecte ou minime dans la fabrication des lots.

IV.2.1.1.1 - Définition d'une RPE

Une RPE est constituée d'un ensemble d'objets actifs et/ou passifs tels que agitateur, échangeur d'énergie calorifique, vannes, pompes , etc. Le critère de groupement d'objets pour former une RPE repose sur l'existence de liens connexes qui conduisent les éléments concernés à concourir conjointement leur action individuelle à réaliser une opération de transformation ou de maintien de l'état d'un lot ou des matières premières.

Par conséquent, une RPE a une autonomie dans l'exécution d'une partie ou de la totalité d'une phase de transformation.

Notons que la notion de RPE se distingue de celle attribuée aux objets physiques commandables, éléments de base de décomposition de la partie opérative dans CASPAIM : une RPE diffère d'une part par sa structure (association d'objets physiques) et d'autre part par le niveau élevé de l'opération qu'elle réalise (intervention directe dans la transformation du lot).

Projeté sur le modèle hiérarchique de référence de la partie opérative établi par la communauté ISA/SP88¹, une RPE confond le niveau 3 "unité" et le niveau 2 "module d'équipement". Cependant seuls les modules d'équipement qui transportent les matières premières, les additifs et les lots et, qui desservent un certain nombre d'unités peuvent être isolés comme étant RPEs.

Du point de vue processus de préparation du lot, une RPE accomplit un des deux types de fonction suivante :

- transfert de matières : exemple d'un système de pompage composé de tuyauterie, de vannes, de pompes,
- transformation ou maintien de l'état des lots, des additifs, ou des matières premières : exemple d'un réacteur composé d'une vanne de chargement, d'une vanne de vidange, d'un agitateur et d'un échangeur calorifique.

IV.2.1.1.2 - Modèle d'une RPE

Nous nous intéressons à une **image externe** de chaque RPE permettant de la sélectionner, de l'associer avec d'autres RPEs, et de la paramétrer afin d'y accomplir un objectif transformationnel d'un lot par le biais des commandes locales. Nous caractérisons alors une RPE par un modèle (fig.IV.3) comportant trois types de paramètres :

- paramètres définissant les liens structurels de connexion avec d'autres RPEs. Cette caractérisation s'apparente étroitement à la description des relations d'accessibilité des ressources faites dans la méthodologie CASPAIM.
- paramètres d'états qui indiquent l'activité dynamique. Cet état comprend à la fois la description des états discrets tels que les états libre, occupée, en maintenance ainsi que les états continus tels que l'évolution des grandeurs caractéristiques (exemple : niveau de stock (Lv), la concentration (Cc)).

¹ "Batch control systems, Models and Terminology" Aout 91 2nd draft of The Instrument Society of America ISA dS88.01

- paramètres sur le mode de conduite. Une RPE peut être conduite en mode Manuel, en mode Automatique, ou en mode semi automatique.

Prenons le cas d'une RPE de type transformationnel, un réacteur par exemple, sa représentation externe peut être résumée par le tableau suivant :

Liens d'accessibilité		Modèle d'états		Mode de conduite
Lieux d'entrée	Lieux de sortie	Etats discrets	Etats Continus	
liste des vannes d'entrée : Ve1, Ve2, Ve3	liste des vannes de sortie : Vs1	<p>Occupé</p> <p>Libre En maintenance</p>	<p>Grandeurs caractéristiques</p> <p>Lv : Niveau de stock</p> <p>Cc : Concentration</p>	<p>Automatique</p> <p>Manuel</p> <p>Semi-automatique</p>

fig.IV. 4 - Exemple de modèle externe d'un réacteur

Dans cette étape de spécification de la partie opérative, notre but est d'obtenir un modèle structurel statique du procédé. Nous procédons alors à une décomposition de l'installation par identification des RPEs existantes sur les lignes de fabrication et à la définition systématique des liens d'accessibilité pour chaque RPE.

Prenons l'exemple d'un procédé où la préparation d'un lot débute dans un des deux pré-mélangeurs (PM1, PM2) dans lesquels deux types de matières premières sont mélangés et chauffés. Le lot est ensuite transporté dans un des trois réacteurs (R1, R2, R3), puis après addition de catalyseur et d'additifs, le lot résultant est refroidi puis transféré vers un des deux cuves de stockage (D1, D2) où le dosage du ph est effectué par ajout d'un additif. Une décomposition du procédé par identification des RPEs est illustrée par la figure fig.IV.5.a.

Notons ici qu'il n'existe aucune méthode conduisant à une décomposition unique d'une installation batch. Des travaux sur la définition et la synchronisation des unités batchs ([ROSE82] et [ROSE87]) proposent seulement des critères d'identification d'unités et de groupement des éléments physiques. Nous ne saurions que suggérer quelques règles pratiques qui relèvent du bon sens. Une démarche pratique de décomposition consiste par exemple :

- premièrement, à isoler les unités physiques contenant les matières premières, les additifs et les lots. L'isolation doit permettre une autonomie de fonctionnement de l'unité vis à vis de son environnement. Ainsi considérer les vannes d'entrées et de sorties communes à des éléments de transfert étant parties intégrantes des unités physiques rend les RPEs résultantes indépendantes du reste du procédé dans la réalisation des phases de transformation.

- deuxièmement, pour les éléments restants, isoler les éléments de transfert communs à plusieurs unités isolées. Les éléments de transfert réservés à deux unités peuvent être intégrés faisant partie d'une des unités.
- troisièmement, définir les liens d'accessibilité **externe** (c'est à dire entre RPEs (fig.IV.5.b)) et les liens d'accessibilité **interne**. Ce dernier cas concerne les RPEs de type transfert qui peuvent nécessiter une description sur leur structure interne. En effet, l'identification par isolation ne montre pas l'existence potentielle des lignes de transfert indépendantes au sein des RPEs. Pour les RPEs de transfert multi-entrées et multi-sorties, leur structure interne peut révéler un nombre variable de lignes de transfert possibles. Par conséquent, une RPE de transfert peut être affectée à un instant donné à un nombre variable de lots demandeurs de ressources. Afin de permettre une recherche dynamique de lignes de transfert (donc une maximisation du taux d'activité), une liste exhaustive de combinaison d'états des vannes (fermées, ouvertes) ainsi que les sens et les directions possibles peuvent être établi sous forme de table ou de structure de données.

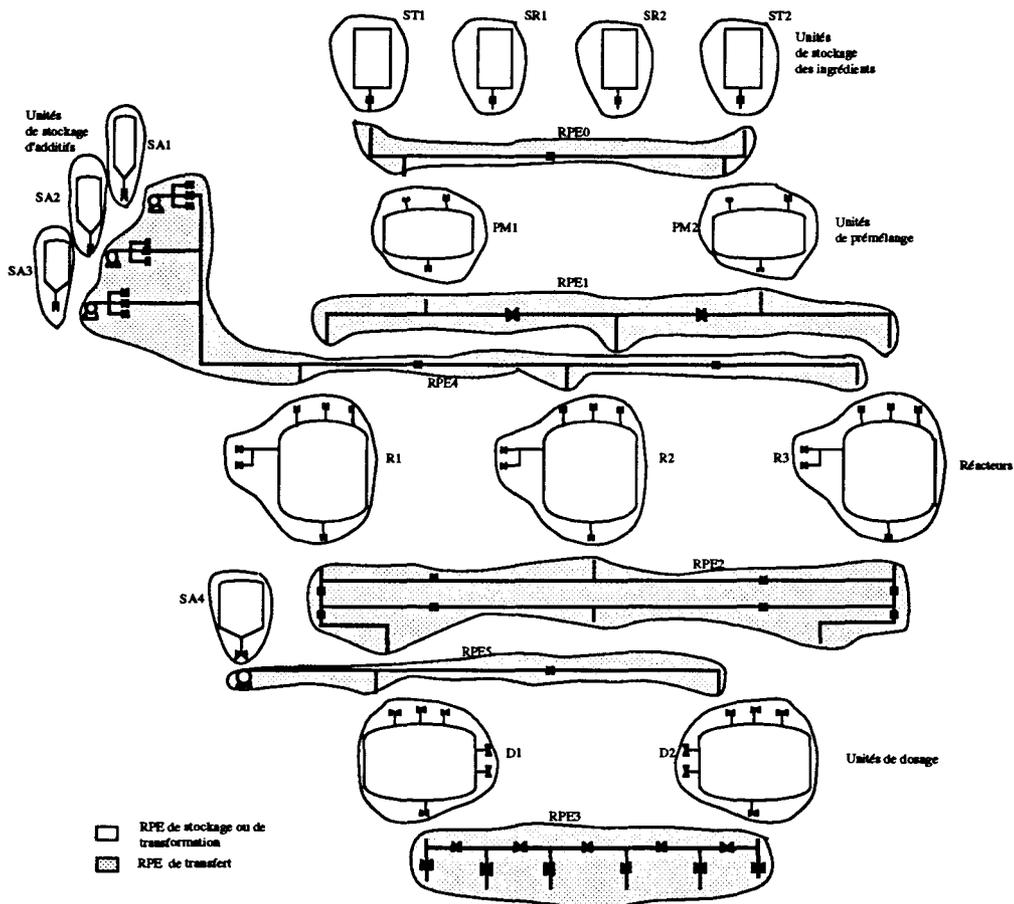


fig.IV.5 a - Décomposition du procédé en RPEs.

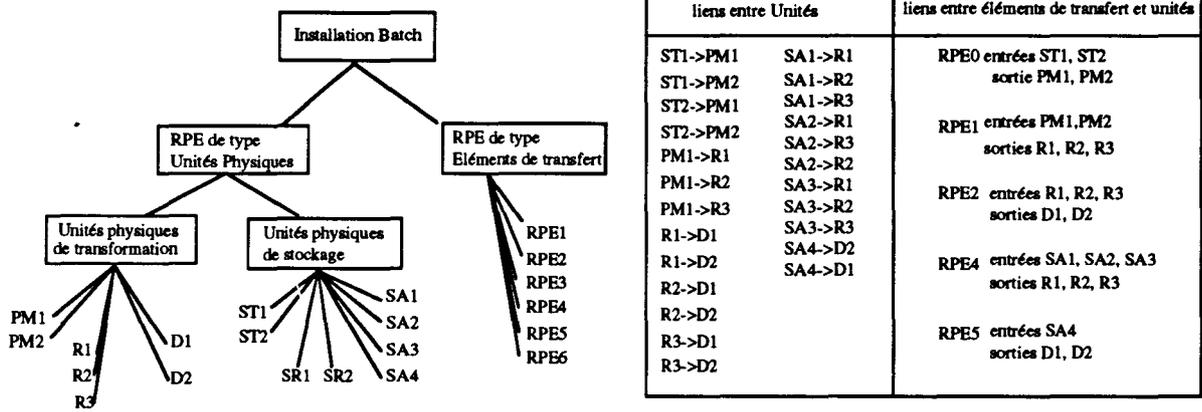


fig.IV.5.b - liste des RPEs et table des relations d'accessibilité

IV.2.1.1.3 - Notion de Ressources Physiques à Configuration Dynamique (RPD).

L'existence des opérations du type FedBatch et de transfert de lots nous amène à introduire la notion de ressource physique à configuration dynamique. Une RPD associe pour un intervalle de temps (durée d'une phase de transformation ou de transfert) un nombre déterminé de RPE.

Une RPD est constituée d'un nombre fini de RPEs (RPEs sources) de fonction transformation ou stockage reliées chacune à une même RPE (RPE destination) de fonction stockage et/ou transformation par l'intermédiaire d'une RPE de type transfert (RPE de transit).

Afin d'exploiter au maximum la flexibilité d'un SPFB, la constitution d'une RPD nécessite l'intervention d'un niveau décisionnel (module d'allocateur de ressources). Son rôle est d'établir dynamiquement la construction d'une RPD en sélectionnant les RPEs constitutives parmi une liste de RPEs candidates selon des critères sur l'état discret et continu (disponibilité continue et discrète), selon l'existence de liens de connexion et des critères d'optimisation (exemple le chemin le plus court, chemin offrant un transfert multiple et simultané). Nous développerons dans la partie IV.3 une analyse fonctionnelle et une proposition d'implantation de ce module d'allocateur de ressources.

Résumé

L'analyse de la partie opérative d'un SPFB nous a conduit à décomposer les lignes de préparation en composants élémentaires, fonctionnellement et physiquement, indépendants : RPE de type transfert et RPE de type transformation et/ou de stockage. La mise en œuvre des RPEs nécessite la connaissance d'un modèle externe qui doit contenir les informations pertinentes sur les liens structurels avec son environnement, sur les états dynamiques et sur son mode de fonctionnement. L'interprétation en temps réel de ces données par un niveau de

décision afin de construire des RPDs et d'y allouer une phase de transformation permet d'exploiter la flexibilité de l'architecture structurelle de l'installation.

IV.2.1.2 - Modélisation de la commande "produit ou lot".

Rappelons ici que la recette d'un lot contient deux types de description :

- une première description qui définit la nature et la quantité des ingrédients, la formule de synthèse ou de séparation ainsi que les différentes contraintes de préparation (sécurité, technologique, qualité).
- la procédure de fabrication, qui explicite le processus de préparation en phases de transformation dont chacune est décomposée en opérations élémentaires.

Nous considérons que ces spécifications sont déjà établies et exploitables à partir d'une base de données ou d'un cahier des charges. L'élaboration de la recette de même que sa formalisation pour la valider n'est pas du domaine de notre étude. Le but de la démarche transposée est d'exploiter la recette et plus précisément la procédure de préparation en vue d'une implantation de la commande de coordination.

Nous rappelons également que la crédibilité de la transposition de la méthode CASPAIM repose essentiellement sur la notion de phase de transformation que nous allons définir explicitement.

Définition d'une phase de procédure d'une recette.

Nous appelons phase de transformation d'un lot un ensemble d'opérations voulues qui contribuent à la modification de son état (positionnel et/ou physico-chimique) et dont le support physique d'exécution est isolé du reste du procédé soit par une RPE soit par une RPD.

Approche fonctionnelle de la recette

La démarche transposée de conception de système de pilotage/coordination commence par la spécification fonctionnelle des objectifs à réaliser sur un SPFB. Un lot est alors représenté sous forme de **procédure** dite **logique** de la recette que l'on peut définir comme suit :

la procédure logique d'une recette décrit les contraintes d'ordre des phases de transformation pour obtenir un lot préparé à partir des ingrédients. Elle préserve un niveau élevé de description en restant indépendante de toute nature d'architecture

matérielle de SPFB. Ainsi seules les phases de type transformation d'états physiques sont prises en compte par les procédures logiques de recette.

Les opérations de type transfert ne seront pas abordées ici puisqu'elles font intervenir les moyens de production.

Nous exprimons le séquençement de phases d'une procédure logique à l'aide du formalisme RdP Ordinaire. Nous associons alors au niveau des transitions les phases de transformation et au niveau des places les états d'avancement du lot dans son processus de préparation.

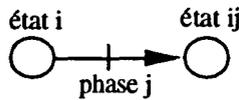


fig.IV.6 - Primitive de description d'une procédure logique.

Prenons l'exemple cité au §IV.1, les phases de transformation de la procédure logique sont :

- phase 1 : prémélange et préchauffage.
- phase 2 : réaction et refroidissement.
- phase 3 : dosage du ph et refroidissement.

Et la procédure logique de recette correspondante est la suivante :

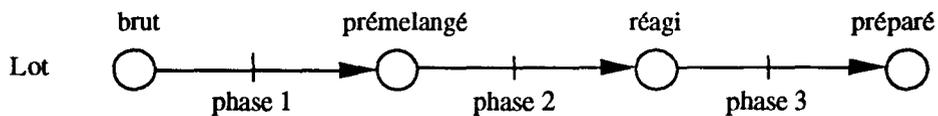


fig.IV.7 - Modélisation fonctionnelle d'un lot

Dans de nombreux cas de SPFBs, on constate la linéarité du modèle RdP de la procédure logique de la recette. Ce fait peut s'expliquer par la pauvreté de flexibilité des processus de préparation batch (il est très rare qu'on puisse permuter des phases de transformation d'un lot).

Il est possible par contre qu'une phase de type informationnelle doit être introduite dans la procédure logique pour montrer la réalité du procédé de transformation. Dans ce cas, l'information qualitative qui résulte de la phase de test doit être représentée explicitement. La prise en compte des différentes valeurs possibles du résultat nécessite alors une extension du RdP Ordinaire. La modélisation par RdP Colorés est alors mieux adaptée pour ce type de phase. Le résultat du test est traduit par des Couleurs sur les arcs, par exemple ph_neutre,

ph_basique pour une phase d'analyse après une phase d'électrodialyse. La procédure logique correspondante est la suivante :

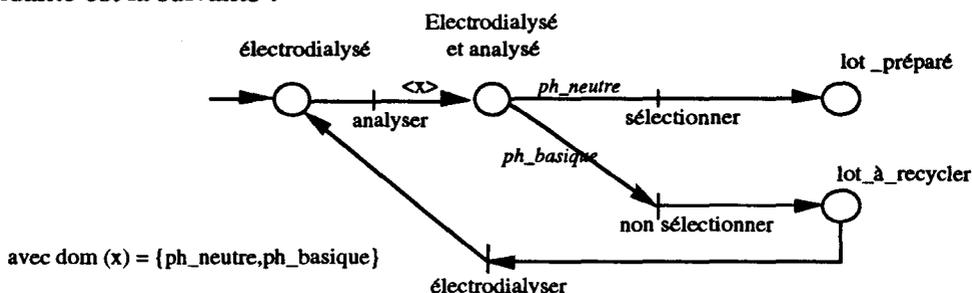


fig.IV.8

IV.2.2 - Génération de la procédure opératoire.

Dans cette étape, nous introduisons progressivement sur l'ossature procédure logique les moyens de production et leurs contraintes structurales. La synthèse entre modèle logique et modèle physique va nous donner un modèle réel d'élaboration du lot sur une installation donnée. Nous appelons le modèle obtenu "**procédure opératoire d'une recette**" que nous définissons comme suit :

Une procédure opératoire d'une recette décrit la succession des états stables issus de chaque phase de transformation ainsi que la succession de RPEs qui indiquent les lieux de localisation de chaque état. Elle fait correspondre alors tout état d'avancement d'un lot à préparer à des RPEs d'une installation donnée.

La démarche de fusion des deux modèles se déroule alors en deux étapes successives :

Etape 1 - Affectation au niveau des places (partie inférieure) de toutes les RPEs susceptibles de contenir le lot après la fin de chaque phase indiquée par la transition en amont. Cette fusion s'accompagne d'une description implicite des liens de connexion entre les RPEs ajoutées. Le modèle décrit ainsi les chemins possibles du lot et caractérise la flexibilité de routage.

Etape 2 - Introduction des phases de transfert de lots, puis celles des additifs et des ingrédients par un mécanisme d'éclatement des transitions représentant les phases. Cet éclatement insère les places qui indiquent les RPDs. Le modèle final décrit finement les RPEs mises en jeu pour réaliser chaque phase de transformation.

IV.2.2.1 - Etape 1 : Intégration des RPEs

L'affectation des RPEs au niveau des places a été possible grâce à la caractéristique suivante de la préparation batch : toute phase de transformation d'un lot se termine par le stockage du lot avec la valeur ajoutée soit sur le lieu de transformation soit sur une des RPEs qui constituent la RPD de transformation. Les états d'avancement d'un lot sont donc identifiables sur les RPEs du procédé.

Les RPEs candidates pour chaque état sont alors indiquées au niveau des places en aval de la phase de transformation. Le modèle traduit ainsi la flexibilité de choix de RPEs. Sur l'installation illustrée par la figure IV.5, la procédure logique de l'exemple de la figure IV.7 nous donne une première forme de procédure opératoire.

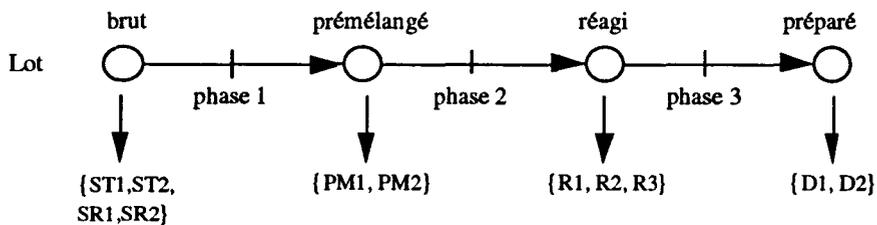


fig.IV.9 - Affectation des RPEs aux états de transformation

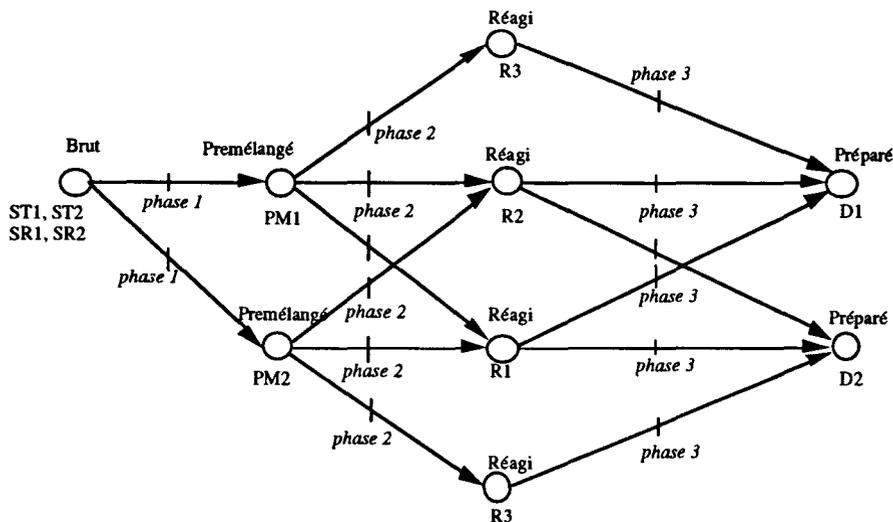


fig.IV.10 - Procédure opératoire intermédiaire : flexibilité de choix de ressources.

Remarquons que la place représentant l'état brut n'est pas dupliquée autant de fois que le nombre RPEs affectés. Ce fait traduit la définition d'un lot qui n'apparaît physiquement qu'à la fin de la première phase de traitement des ingrédients. Cette place tout à fait artificielle est ajoutée pour marquer l'état de départ du processus de préparation et est utile du fait qu'elle indique les RPEs de stockage des ingrédients principaux.

IV.2.2.2 - Etape 2 : Insertion des RPDs de transfert.

La prise en compte des phases de transfert de lots, d'additifs et des transformations de type FedBatch nécessite l'introduction des RPDs sur la procédure opératoire intermédiaire. Les RPDs sont insérées sur le graphe de la procédure par un mécanisme d'éclatement de la macro-transition représentant une phase. Une macro-transition est alors expansée en une séquence de transition-place-transition. Ce mécanisme est répété jusqu'à l'obtention d'un niveau de description explicite des RPEs nécessaires à l'exécution d'une phase.

La génération de la procédure opératoire consiste en un développement par niveau des macro-transitions comme l'illustre le schéma suivant :

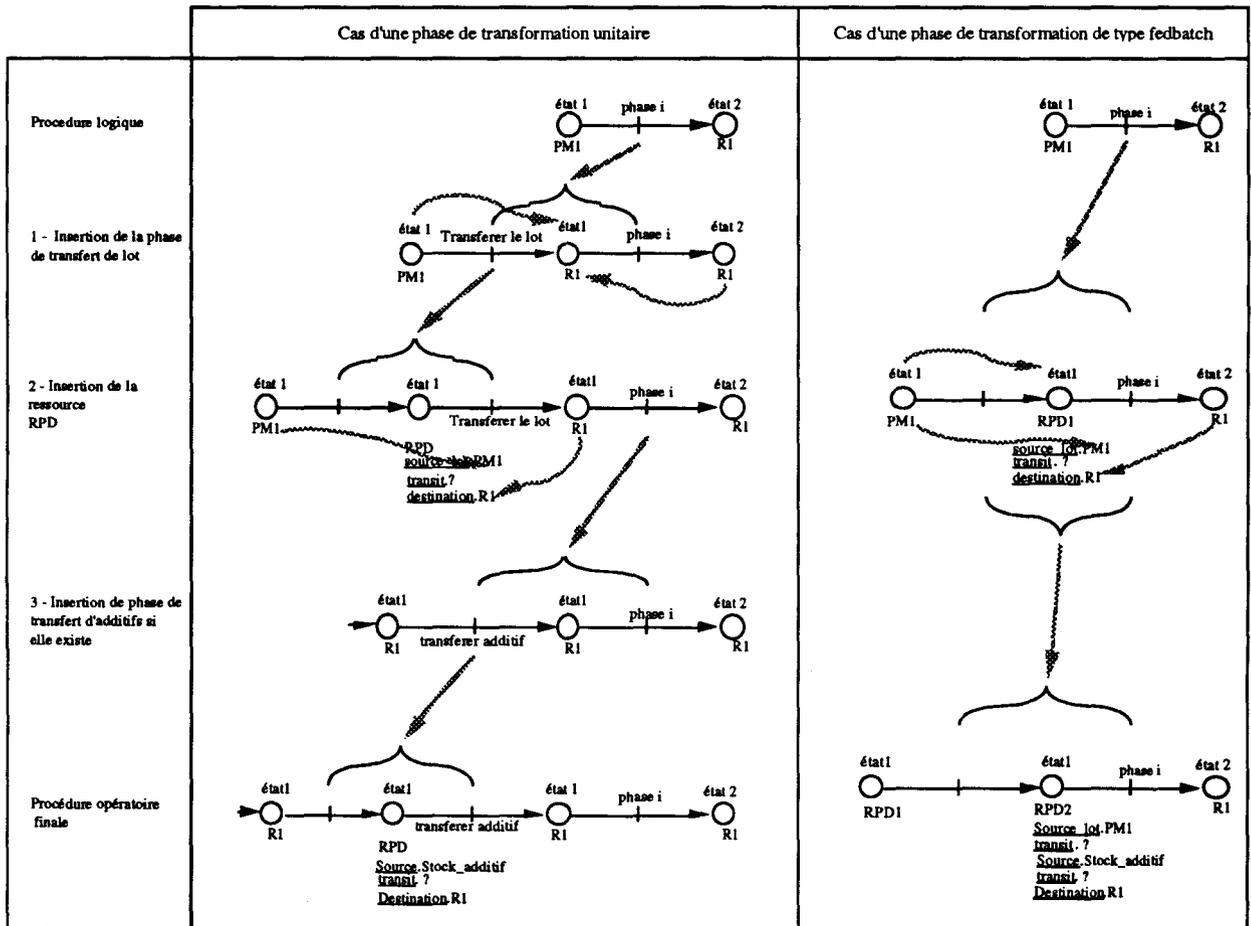


fig.IV.11 - Etapes de génération de la Procédure Opératoire.

En résumé, la procédure opératoire générée pour une phase de transformation de type unitaire avec utilisation d'additifs est la suivante :

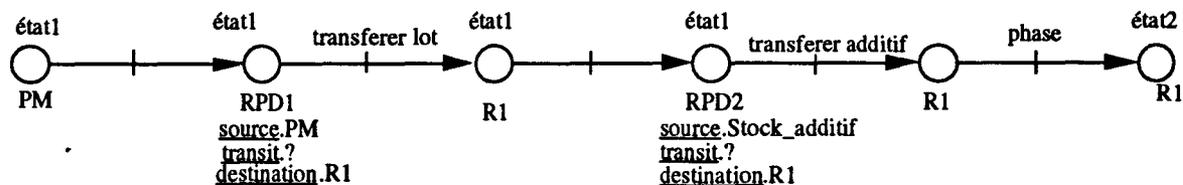


fig.IV.12

IV.2.3 - Génération de la Procédure Opératoire Etendue (POE).

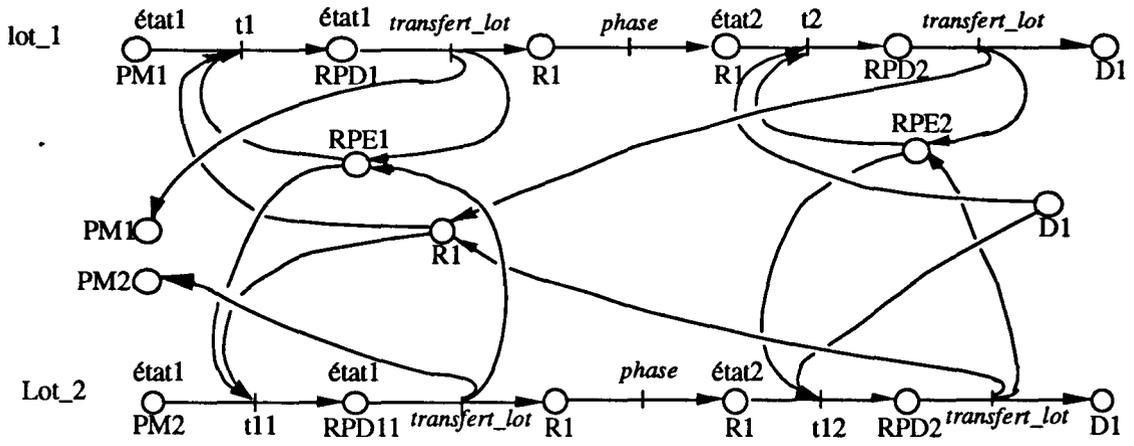
Le modèle complet de la commande "produit" final est obtenu en enrichissant la procédure opératoire des places de communication avec le gestionnaire des états des RPEs et de leur contenu (ingrédients ou additifs). En effet, il est tout à fait judicieux de considérer qu'un lot qui doit être traité par un réacteur par exemple, demande l'allocation de la RPE, l'occupe pendant la phase de transformation, et le libère en fin de traitement.

L'expression de ce mode d'échanges est introduite sur la procédure opératoire au moyen des protocoles d'accès aux RPEs qui peuvent se définir comme suit :

le protocole d'accès à une ressource est un mécanisme traduisant la réservation des ingrédients et des additifs, ainsi que l'allocation et la restitution des RPEs.

La figure IV.12 illustre une situation classique qui montre la nécessité de systématiser au niveau des procédures opératoires la prise en compte des protocoles d'accès. La synchronisation de l'occupation des ressources partageables (PM1, PM2, R1, RPE1, RPE2, D1) par des lots 1 et 2 concurrents est indiquée ici par les arcs provenant et partant d'une place image de l'état de la ressource. Il est à remarquer que le placement de ces arcs de synchronisation traduit de la part du concepteur un choix de stratégie d'utilisation de ressources (stratégie d'accès sûr, stratégie d'accès en temps masqué).

Ces deux stratégies peuvent être mises en œuvre par exemple pour la réalisation d'une phase avec ajout d'additif stocké dans une unité partageable. La première préconise d'assurer la disponibilité du réacteur et de l'unité de stockage d'additif ainsi que la quantité requise avant de transférer le lot vers R1. Un arc de synchronisation avec l'état de l'unité de stockage est ajouté à l'entrée de la transition t1. La seconde suggère d'envoyer le plus tard possible la demande d'accès à l'unité de stockage c'est à dire une fois que le lot se trouve dans le réacteur R1. Celle-ci induit une meilleure performance d'utilisation des ressources due au fait que la ressource unité de stockage peut être sollicitée par un autre lot pendant le transfert du lot1.



RPE1, RPE2 : tronçons de transfert

fig.IV 12

Le report de ces échanges de synchronisation au niveau procédure opératoire est l'objet de cette étape de prise en compte des protocoles d'accès. La mise en œuvre de l'intégration des protocoles d'accès consiste alors à :

- 1 - envoyer une demande d'allocation à une RPE de type transformation ou stockage qui, dans ce dernier cas, peut être paramétrée par une quantité sur le contenu de la RPE puis se mettre dans un état d'attente,
- 2 - réceptionner la RPE allouée et envoyer une requête de RPE de transfert de connexion puis se mettre dans un état d'attente,
- 3 - réceptionner la RPE de transfert trouvée et occuper l'ensemble des ressources allouées,
- 4 - libérer les ressources après utilisation.

Ce protocole peut être représenté par la séquence d'actions suivantes :

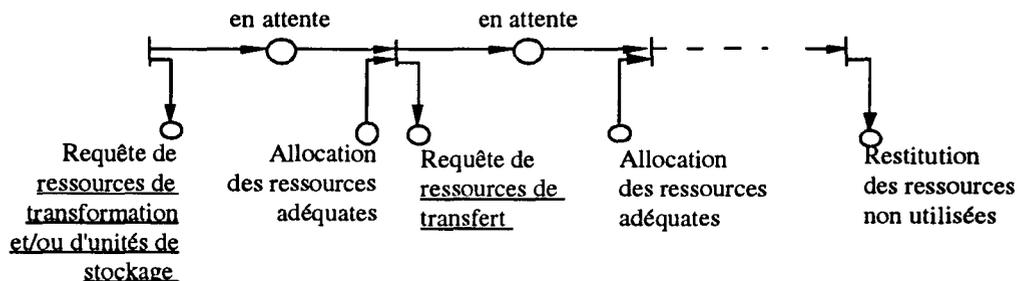


fig.IV.13

L'ajout des protocoles d'accès au niveau des transitions de synchronisation avec l'état des ressources partagées nous donne le modèle de la commande "produit" de coordination. L'exemple de la procédure opératoire du lot1, après intégration des protocoles d'accès, donne la P.O.E suivante :

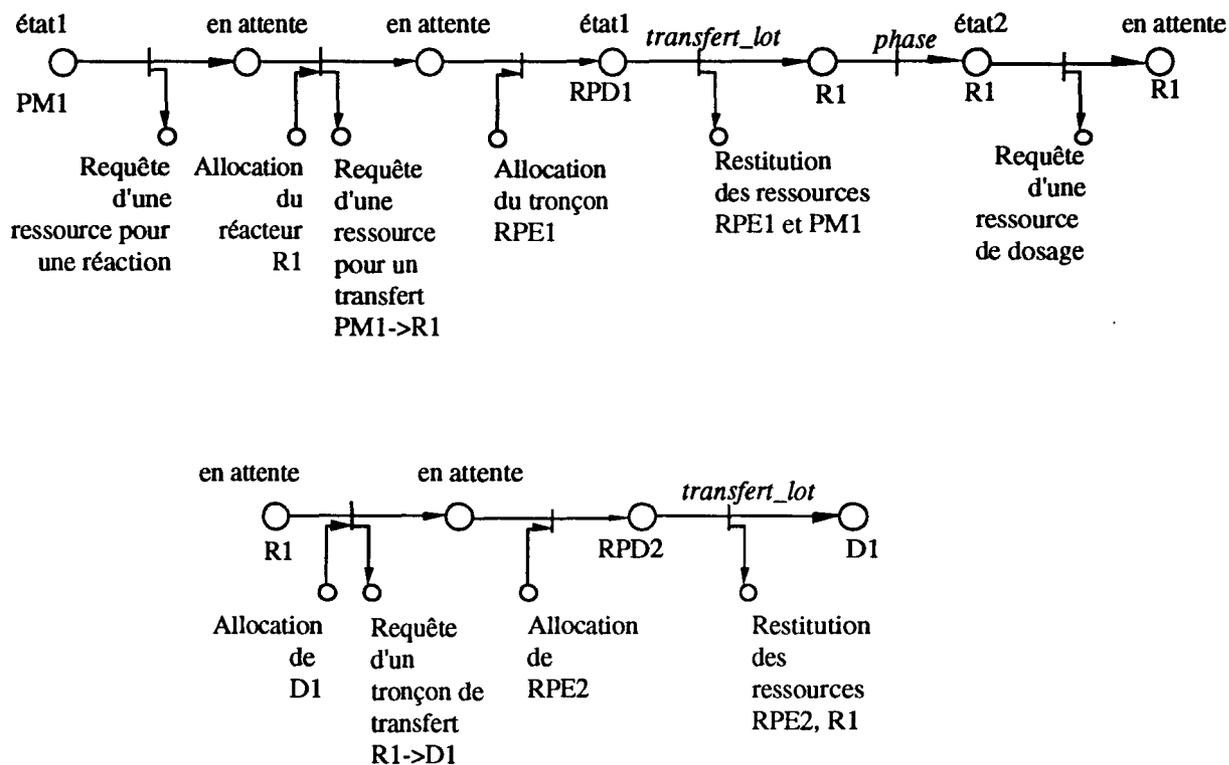


fig.IV.14

Notons qu'une transition modélisant une phase représente implicitement la succession d'étapes suivantes :

- étape d'initialisation qui consiste à lire la base de données de recette, à envoyer au niveau des commandes locales les valeurs des paramètres et la séquence d'opérations de la phase, à activer les procédures d'exception.
- étape d'activation qui consiste à envoyer la commande de début de phase et à activer la temporisation de la phase.
- étape de terminaison qui consiste à enregistrer dans la recette du lot les événements se produisant au cours d'une phase de préparation.

Conclusion

Nous avons exposé au cours de cette partie la démarche transposée de la méthode CASPÁIM sur les SPFBs. Elle conduit par une approche structurée et progressive à l'obtention d'un modèle de la commande de coordination. Elle est structurée par le fait qu'elle dissocie l'aspect fonctionnel (procédure logique) et l'aspect opérationnel (architecture matérielle). Son avantage est qu'une remise en cause de l'architecture matérielle, ce qui est plus fréquent en exploitation, ne modifie pas la totalité de l'étude. De même elle a aussi la qualité d'être progressive car les données de la spécification matérielle sont introduites par étapes successives et en fonction de leur type et leur niveau de détail pour affiner le modèle fonctionnel du lot.

Le modèle de coordination de la commande obtenue est avant tout un modèle statique caractérisant la flexibilité de choix de ressources. Par conséquent, il est par nature non déterministe. La prise en compte des aspects dynamiques tels que l'évolution d'états des ressources, le changement des consignes de préparation permet de le traduire en commandes déterministes par affectation à un instant donné d'une phase à une ressource bien déterminée. Nous attribuons ce dernier rôle de traduction au module d'allocateur de ressources qui sera l'objet de la partie suivante.

IV.2.4 - Allocateur de ressources

Les SPFBs font cohabiter au sein d'une même installation la préparation d'un certain nombre de lots de recettes différentes. Le partage d'un nombre limité d'unités de transformation, de tronçons de transfert communs et de quantité finie d'ingrédients et d'additifs entre des lots concurrents requiert dans ce cas une gestion appropriée de ces ressources. La complexité de cette fonction que nous avons déjà eue l'occasion d'évoquer dans la partie §II.2.4.1.2.b, est due en grande partie à l'aspect à la fois continu et discret du processus étudié.

IV.2.4.1 - Spécification fonctionnelle

Le module d'allocateur a pour finalité la satisfaction des requêtes reçues de la part des lots demandeurs en leur affectant les ressources correspondantes. Cet objectif n'est en fait que le résultat d'une recherche à effectuer dans un délai raisonnable, de la ressource idéale répondant aux différents types de contrainte dont principalement :

- **l'accessibilité.** Les ressources qui sont susceptibles d'être affectées à un lot demandeur doivent être accessibles soit de façon directe soit par l'intermédiaire d'une RPE de transfert en partant de la RPE qui contient le lot demandeur.
- **la disponibilité des ressources.** La disponibilité peut comporter des conditions mixtes à la fois sur l'état externe (disponibilité discrète) et sur l'état interne (disponibilité continue) d'une ressource. Prenons le cas d'une requête demandant une unité de stockage d'additif, les RPEs candidates doivent être à la fois dans un état discret non alloué et dans un état continu défini par une valeur seuil de la grandeur niveau de stock (par exemple $L_v > L_{\text{Quantité_demandée}}$). La disponibilité continue est due au caractère "continu" de la notion de capacité d'une réservoir.
- **le mode de conduite des ressources.** Etant donné que l'allocateur de ressources ne fonctionne qu'en mode de conduite automatique de l'installation, seuls les RPEs disponibles dans l'état de conduite automatique peuvent être alloués aux lots demandeurs.
- **la compatibilité des ressources.** Ce type de contrainte concerne surtout les RPEs de transfert et les RPEs de transformation de lot. Elle assure la neutralité ou bien la compatibilité des RPEs disponibles vis à vis des propriétés physico-chimiques du lot demandeur.
- **la priorité des lots.** Elle peut être statique si elle reste invariante pendant le cycle de préparation. Elle peut être aussi dynamique afin de tenir compte de facteurs aléatoires de la préparation.
- **l'optimisation des indicateurs de performance.** Les indicateurs sont propres à chaque type de SPFB et, traduisent en terme de grandeurs mesurables ou quantifiables les facteurs d'une meilleure exploitation de l'installation.

De même que la fonction de mise en relation entre une requête reçue et la ressource correspondante occasionne des situations conflictuelles qui amènent le module allocateur à prendre des décisions et éventuellement à informer les autres modules de la supervision. Les situations conflictuelles dans le cas des SPFBs sont principalement :

- **situation 1** : plus d'une ressource peut offrir le même service demandé par un lot. On est dans le cas d'une situation de routage flexible.

- **situation 2** : une seule ressource satisfait les conditions imposées par plusieurs requêtes. C'est le cas de la concurrence.
- **situation 3** : une seule ressource est à la fois accessible et disponible pour une requête mais elle est non compatible avec l'état physique du lot demandeur. C'est le cas d'une incompatibilité détectée.
- **situation 4** : aucune ressource n'est disponible pour une requête reçue. C'est le cas d'une famine qui peut être bloquante ou de durée temporaire.

IV.2.4.2 - Types de décisions envisageables

Dans les cas de la situation 1 et 2, l'affectation d'une ressource à un lot demandeur résulte d'une prise de décision respectant les impératifs de préparation traduits par les priorités de lots.

La situation 3 nécessite une décision de configuration d'états. La connaissance de l'origine de l'incompatibilité permet de solliciter soit une reconfiguration d'états internes de la RPE par activation de procédure automatique (cas d'un SPFB hautement automatisé) soit une intervention de l'opérateur de conduite (pour des opérations manuelles), du gestionnaire des modes de fonctionnement (passage en mode semi-automatique ou manuel), du module d'ordonnancement local (par insertion d'un lot nettoyeur). La détection de cette situation peut être faite par comparaison des caractéristiques physiques du lot demandeur avec celles du dernier lot affecté.

Dans le cas de la situation 4, la durée d'attente d'un lot demandeur peut devenir un facteur déterminant sur la décision à prendre. En effet, si elle reste dans un intervalle de temps acceptable, une affectation anticipée à une ressource qui va être probablement disponible dans un futur proche peut être envisagée. Cette alternative peut se réaliser par insertion de l'identificateur du lot dans une liste d'attente de la ressource en question.

Dans le cas contraire, la recherche de la solution à prendre dépasse le rôle d'un allocateur de ressources. Elle empiète sur les fonctions de la surveillance, de la maintenance voire celui de l'ordonnancement local.

Présenté sous forme d'algorithme, le mécanisme de recherche des ressources à allouer et de prise de décisions par un module d'allocateur de ressources peut être décrit comme suit :

Tant Que (Mode_de_Fonctionnement == Automatique)

Recenser les requêtes de libération de RPEs;
Mettre à jour l'état des ressources;
Recenser les requêtes d'accès aux RPEs;
Classer les requêtes reçues en fonction du type de RPE demandée;
/ --- ex : classe de requêtes d'accès au réacteur, au doseur, au pré-mélangeur --- */*

Pour chaque classe de requêtes

Ordonner suivant l'ordre de priorité;

Pour chaque requête

RPEs_Candidates <- la liste des ressources Accessibles, Disponibles et en Mode de Conduite Automatique;

CAS Nombre RPEs Candidates et Compatibles > 1

Choisir la RPE qui optimise les critères de performance;
Affecter la RPE trouvée au lot;
Modifier l'état de la RPE;
Effacer la requête de la classe;

CAS Nombre RPEs Candidates == 1

SI RPE est Compatible

ALORS

Affecter la RPE trouvée au lot;
Modifier l'état de la RPE;
Effacer la requête de la classe;

SINON

/ --- cas d'incompatibilité --- */*

Possibilité de reconfiguration dans une durée d'attente acceptable?

SI oui **Alors**

Lancer la procédure de reconfiguration (en mode manuel ou automatique);
Affecter la requête dans la liste d'attente de la ressource;
Modifier l'état de la RPE;
Effacer la requête de la classe;

Sinon Nombre_RPEs_candidates = 0;

CAS Nombre RPEs Candidates == 0

/ --- cas de famine --- */*

Evaluer la durée d'attente du lot demandeur ;

SI temps d'attente < Temps Critique

Choisir entre

Mise en attente pour une prochaine affectation;

OU { *Affectation anticipée à une ressource prochainement disponible;*
Affecter la requête dans la liste d'attente de la ressource;
Effacer la requête de la classe;

SINON

/ --- dépassement de la durée d'attente autorisée --- */*

Lancer une détection d'anomalie à l'intention de
soit des modules de suivi,
soit du module d'ordonnancement local,
soit de l'opérateur.

Effacer la requête de la classe;

Requête suivante;

Classe de requête suivante;

Fin_Tant_Que

IV.2.4.3 - Implantation centralisée ou repartie

Deux solutions d'implantation de la fonction d'allocation de ressources peuvent être combinées selon le degré de flexibilité d'opérations (choix de ressources), l'existence des lignes indépendantes dans les RPEs de transfert et le nombre de RPEs partageables.

Allocateur Centralisé : un seul module gère les requêtes d'accès à toutes les RPEs d'une installation. Elle permet une exploitation maximale de la flexibilité d'opérations tout en optimisant des critères de performance. Dans cette configuration, les requêtes d'accès sont formulées par adressage fonctionnel, c'est à dire adressage à une classe d'équivalence de ressources accessibles, qui indique uniquement la nature de la phase à réaliser.

Allocateur Réparti : la fonction d'allocation de ressources est déportée au niveau de chaque RPE, principalement au niveau des RPEs partageables. Chaque RPE a son propre module de gestion de requêtes d'accès. Celui-ci est généralement constitué d'une file d'attente de rangement régie par un algorithme d'organisation proche des algorithmes d'allocation de l'unité centrale pratiqués par les systèmes d'exploitation d'ordinateur : FIFO, algorithme basé sur des règles de priorité ou des considérations temporelles. Les requêtes d'accès comportent, dans ce cas, l'identificateur de la RPE concernée. Le mode d'adressage s'effectue de manière directe à l'intention du module d'allocateur de la ressource concernée.

L'association de ces deux types de configuration offre une architecture d'implantation de la fonction d'allocation de ressources plus adaptée aux SPFBs. L'architecture hiérarchisée présentée dans [VER92] (fig.IV.15) présente dans ce sens une solution d'implantation envisageable de répartition.

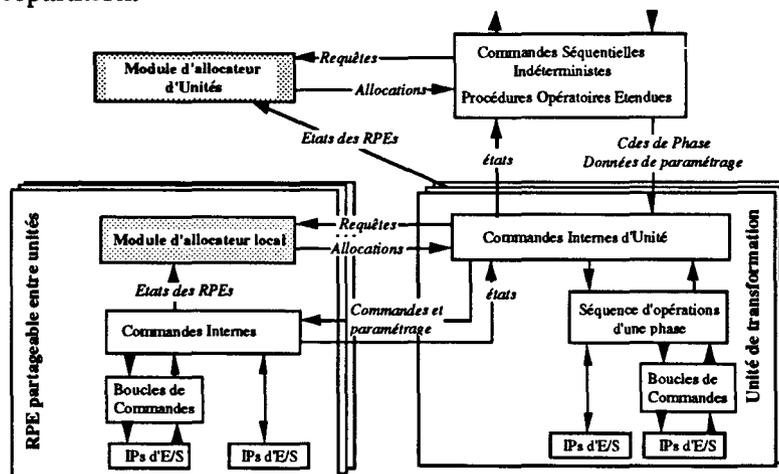


fig.IV.15 - Architecture répartie d'allocation de ressources selon [VER92]

IV.3 - CONCLUSION ET PERSPECTIVES

Ce chapitre constitue avant tout une analyse sur les possibilités de transposition de l'approche "produit" dans la gestion des processus de préparation flexible batch effectuée au niveau pilotage et coordination. L'apparition du besoin de flexibilité dans la préparation batch nous a conduits à envisager la réutilisation de méthodologie de conception du système de commande issue du domaine manufacturier.

L'étude d'une transposition de la méthodologie CASPAIM montre l'adéquation de l'approche produit aux exigences de commande d'ateliers reconfigurables et à préparation multi-flux multi-produits. La faisabilité de l'approche transposée est facilitée par l'existence des éléments à signification équivalente tels que la notion de gamme/recette et la notion de pièce/lot. Cependant l'aspect fluide du lot empêche toute forme d'application directe des méthodologies d'origine manufacturière dans le contexte des SPFBs. Cette difficulté peut être contournée par une conception de la commande s'appuyant sur une vue logique du lot et sur l'association de Ressources Physiques Élémentaires identifiées sur les lignes de préparation.

La démarche transposée de CASPAIM se présente alors selon une succession des étapes de :

- Spécification de la procédure de recette et des lignes de préparation. Cette étape définit la description fonctionnelle du lot en séquence de phases de transformation. En parallèle, les moyens de production sont décrites en Ressources Physiques Élémentaires (RPEs) de transfert et de transformation.
- Génération de Procédures Opératoires. L'introduction progressive des RPEs et des Ressources Physiques à configuration Dynamiques (RPDs) sur le modèle logique de la procédure de recette donne une première modèle de réalisation du lot sur une structure d'installation donnée. Le modèle obtenue explicite les RPEs candidates à chaque phase et caractérise la flexibilité de choix de ressources physiques.
- Génération de Procédures Opératoires Etendues. La prise en compte des protocoles d'accès aux ressources et aux ressources de matières (ingrédients, additifs) complète la procédure Opératoire en ajoutant les places de communication.

La démarche permet alors d'obtenir un modèle conceptuel de la commande de pilotage de lots et de coordination des moyens de production. Le modèle de Procédure Opératoire Etendue est par nature non déterministe du fait qu'il contient la flexibilité d'acheminement de lots et de choix de ressources. La gestion en temps réel de ces indéterminismes ainsi que des situations conflictuelles dues essentiellement au partage de ressources communes nécessitent des prises de décisions à effectuer par le module d'allocateur de ressources.

Une autre perspective de transposition consiste à envisager l'idée d'une extension concernant le cas d'une installation mixte composée d'un SPFB suivi d'un système de type manufacturier. Il s'agit toujours de proposer une démarche méthodologique homogène de conception du système de coordination/pilotage des deux systèmes réunis. Le problème nous paraît résider dans l'analyse de la robustesse de l'approche "produit" dans le contexte des systèmes de production mixtes. En effet, les unités physiques charnières entre les deux systèmes de production provoquent la mort de la notion de recette de lot pour donner naissance à la notion de gamme de pièce. Cette discontinuité de la nature de flux (passage du flux de lot de matière en flux d'objets discrets) pose la question de l'adéquation de l'approche produit dans la conception du système de commande pour ce type de système de production. La solution par approche "machine" [VALEN93] peut être ici une alternative intéressante à envisager.

Du point de vue outil de modélisation, les RdP Hybrides semblent présenter des primitives de représentation de telle transformation de nature de produit. Mais leur utilisation à des fins de conception de la commande reste encore à développer.

CONCLUSION GENERALE

CONCLUSION GENERALE

Pour appréhender de manière adéquate les systèmes dis-continus, toute démarche d'étude doit associer les techniques issues de l'Automatique des Systèmes à Etats Continus et celle des Systèmes à Evénements Discrets. Cette originalité d'approche met au premier plan le problème d'intégration des ces deux spécialités.

Dans l'idée d'une adaptation de démarche de conception évoquée dans cette thèse, ce mémoire apporte, dans un premier temps, quelques éléments d'analyse sur les caractéristiques des **systèmes de production à états continus et discrets dans une finalité de conception de commande**. L'interprétation des éléments tels que le produit, la ressource, le processus de fabrication ainsi que leur dynamique pendant le cycle de fabrication nous permet de distinguer deux classes selon leur contribution dans la structuration de la partie commande :

- une première classe qui présente un fort couplage entre les aspects de nature continue et de nature événementielle requiert une démarche spécifique de structuration.
- une seconde classe qui permet un découplage dû notamment à la flexibilité de fabrication (choix de routage, choix de ressources, paramétrage des opérations de transformation, durée et portée limitées des processus de nature continue) autorise une structuration en couches de commandes de nature différente.

Pour cette seconde classe de systèmes à états continus discrets, le transfert de **méthode de conception orientée produit** doit se baser principalement à la fois sur les points suivants : vue discrète du produit à élaborer, critère de "début/fin" des opérations élémentaires constituant le processus de fabrication et, identification de ressources physiques temporairement isolées et indépendantes de la partie opérative. Appliqué dans le cas des systèmes de production batchs flexibles, le respect de ces conditions de transposition permet la réutilisation de l'approche produit pour **la conception des commandes du niveau coordination des unités de transformation et pilotage des lots en préparation**. Une première démarche de conception du système de coordination/pilotage qui résulte de l'adaptation de la méthode CASPAIM aux spécificités de la préparation batch nous a conduits à l'obtention d'un modèle de commandes séquentielles statiques et non déterministes. La fusion progressive de la description des lignes de préparation sur le modèle fonctionnel de la recette de lots présente ici la procédure

de base de génération du modèle. Son interprétation en temps réel amène à résoudre des situations conflictuelles dues notamment à la flexibilité de la préparation.

Rendre déterministe ce modèle de commande fait appel à des prises de décisions de la part du module d'allocateur de ressources. Son rôle est de faire correspondre les phases de transformation des lots demandeurs aux ressources opératoires disponibles selon la stratégie de mise en œuvre adoptée. L'ordre d'affectation se réalise alors par le paramétrage et l'activation des commandes de niveau local.

L'inadéquation du point de vue macroscopique sur les unités de transformation faite par l'approche produit nous conduit à envisager une méthode appropriée pour la réalisation des commandes locales. Notre démarche consiste tout d'abord à privilégier la spécification du P.C.F. des unités physiques basée sur des critères fonctionnels et de contrôle-commande. La traduction en spécification d'automatisme implantable sur des matériels de commande propriétaires ne représente par conséquent qu'une étape complémentaire de finition.

Un outil d'assistance et de production d'automatisme a été développé sur la base de cette démarche méthodologique. La description modulaire offerte par le langage mixte ARC favorise la production d'automatisme de régulation et séquentiel. Toutefois l'automatisation de cette traduction reste limitée au cas où il est possible d'assembler puis d'instancier des composants logiciels préexistants.

Les travaux exposés dans ce mémoire permettent également de dégager quelques axes prospectifs dont nous en citerons principalement deux :

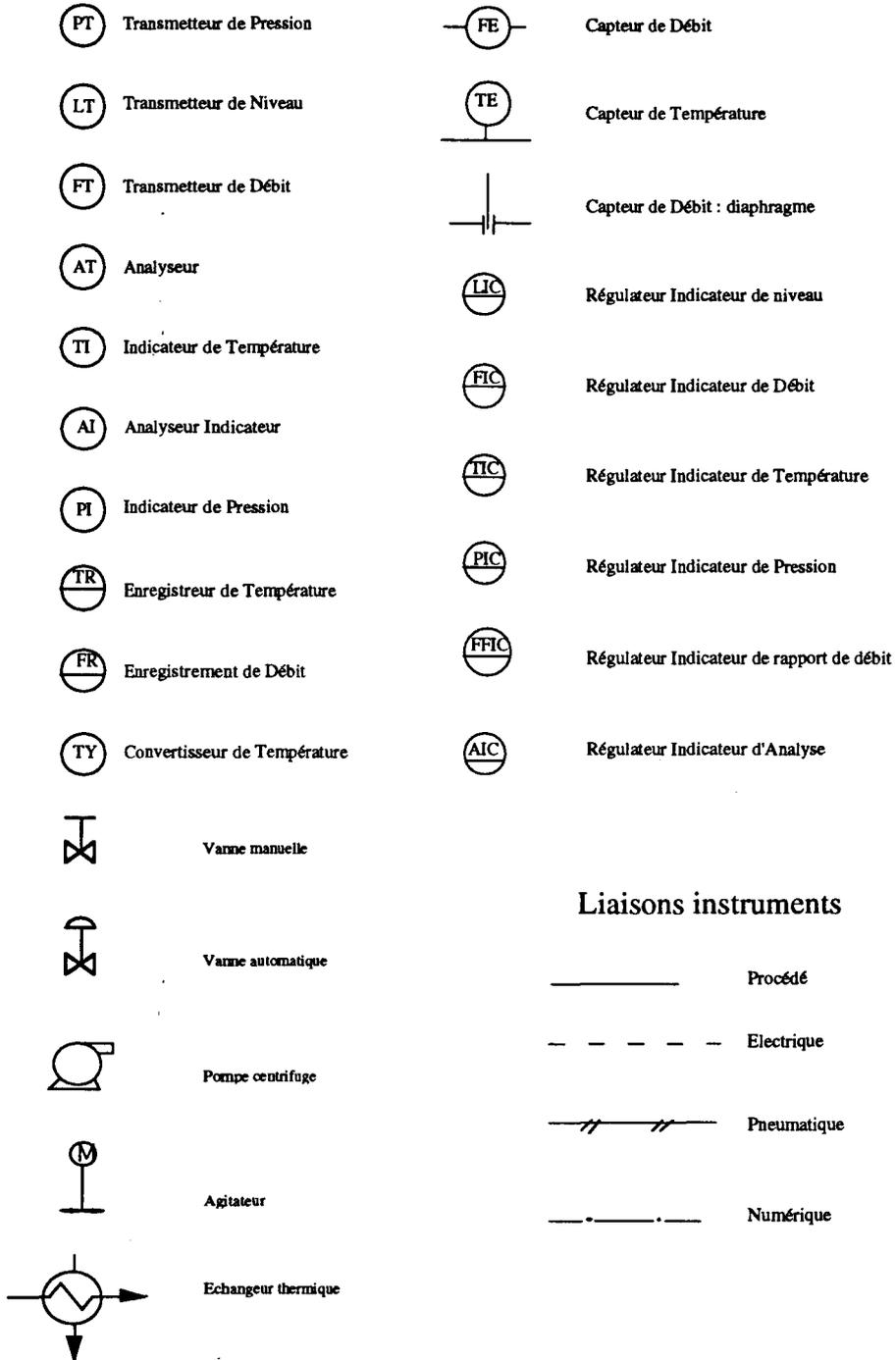
- le premier concerne les commandes inter-ressources, sur l'analyse de la robustesse de l'approche produit pour une installation combinant un système batch et système manufacturier,
- le second est relatif au développement du niveau des commandes intra-ressources, sur l'intégration de la spécification des automatismes logiques et séquentielles ainsi que leur production.

ANNEXES

ANNEXE

ANNEXE I

A.I.1 Les principaux symboles graphiques d'un Plan d'Instrumentation Détaillée [BHAL90].



A.I.2 - Moyens d'automatisation et Données associées.

Niveau 0. Fonctions : Acquisitions, conversions et prétraitements des signaux procédé.

Composants matériels : instrumentation.

Capteurs et analyseurs : ils constituent les points de prise d'information pour entretenir une image fidèle de la dynamique de la partie opérative. Ces interfaces comportent aussi bien des capteurs de mesures analogiques, numériques, logiques que les analyseurs de qualité de la matière à transformer (analyseur de composition, de concentration, pH, ...).

Les actionneurs (pompes, vannes, moteurs, ...) rendent effectifs les ordres de la partie commande en respectant les consignes de fonctionnement imposées.

Données et Communication : Réseau de terrain.

Ce type de réseau fait communiquer les capteurs et actionneurs avec les microcalculateurs de régulation du niveau 1. Leurs caractéristiques permettent leur utilisation dans un environnement industriel et sur une grande distance. Le volume d'informations transmises est relativement faible car les valeurs numérisées sont codées sur quelques bits, par contre, les rythmes de rafraîchissement sont élevés.

Niveau 1. Fonctions : Régulations locales et automatismes réflexes.

Composants matériels : Contrôleurs, Automates Programmables Industriels (API), Automates Régulateurs.

Conçus à base de microprocesseurs, les éléments de ce type d'équipement sont organisés suivant une structure modulaire qui est constituée principalement d'une unité centrale, d'une unité mémoire, d'une unité interface (cartes E/S), d'une unité communication (coupleurs) et d'unité d'alimentation. L'élaboration des fonctions d'automatisme est facilitée par l'utilisation de console et de langage évolué de programmation. Des primitives de fonctions séquentielles, logiques combinatoires, d'algorithme simple de régulation, de sécurité et de communication sont disponibles. La fiabilité du matériel, résultant du respect des normes de sécurité [NFC 63850 CETIM-API], garantit la disponibilité de la commande de ce niveau.

Données et communication : Réseaux locaux industriels (RLI). Les R.L.I ont pour vocation la communication entre automates programmables, calculateurs de conduite et de supervision de niveau 2. Il s'agit le plus souvent d'échanger de messages de quelques mots, ou de télécharger des programmes de taille modeste.

Les R.L.I sont principalement caractérisés par :

- la topologie de l'architecture adoptée (anneau, étoile, boucle, bus, maillée, arbre),
- par son ouverture d'échange (homogène, ouvert, hétérogène),
- par les protocoles et les logiciels de communication (utilisation de standard ou propriétaire),
- par la distance moyenne,
- par la vitesse moyenne de transmission,
- et par une utilisation dans un environnement industriel.

Niveau 2. Fonctions de régulation à coopération multivariable et d'optimisation.

Composants de l'automatisme : SNCC (Structure Numérique de Contrôle-Commande ou Commande Centralisée), calculateurs de processus. Les SNCC sont constituées de blocs régulateurs multi-boucles. Ils sont, en général, reliés en réseau à une console accueillant un superviseur. Ils permettent également de traiter les problèmes d'automatisme de niveau 1 (blocs séquentiels, Grafset, etc.).

Les calculateurs de processus qui, pour des besoins d'automatismes spécifiques, bénéficient d'un système d'exploitation (souvent multi-tâches et temps réel), d'un langage et de modules d'interfaces spécialisés, se trouvent plus adaptés à la conduite de systèmes complexes dans lesquels les aspects algorithmiques nécessaires interdisent le recours aux blocs fonctionnels simples PID.

Données et communication : Réseaux informatiques. Ils relient les différentes applications de l'usine. Les échanges, communication et stockage sont privilégiés par rapport au temps. Des messages longs sont transférés à vitesse élevée. Le réseau Ethernet est très utilisé avec des protocoles de communication standards tels que DECNET ou TCP/IP.

Niveau 3. Fonctions de conduite globale : Supervision, Surveillance et interfaçage avec le service d'ordonnancement.

Composants matériels : Postes de conduite, superviseurs et calculateurs industriels Les postes de conduite, proposés par divers constructeurs (MicroZ de Cegelec, Modumat 8000 de Bailey Sereg, Honeywell TDC, etc.), se présentent sous forme de plate-forme centralisée de configuration. Ils sont essentiellement composés de pupitres à touches multi-fonctions, de moniteurs de visualisation, de dispositifs d'impression et de stockage, d'unité de traitement desservi par un réseau de communication.

Les facteurs de qualité constatés [MESU91] de la supervision reposent sur :

- la convivialité du dialogue homme/machine,

- l'aide et l'assistance proposées par l'interface opérateur / procédé,
- et l'ouverture et la conformité aux standards (réseau et protocole de communication, logiciels de supervision et matériel).

A.I.3 - Rappels des principaux modèles pour les systèmes à états continus et à événements discret

A.I.3.1 - Modèles de représentation des systèmes continus

On distingue principalement deux types de modèles utilisés lors de l'étude de la dynamique des systèmes continus :

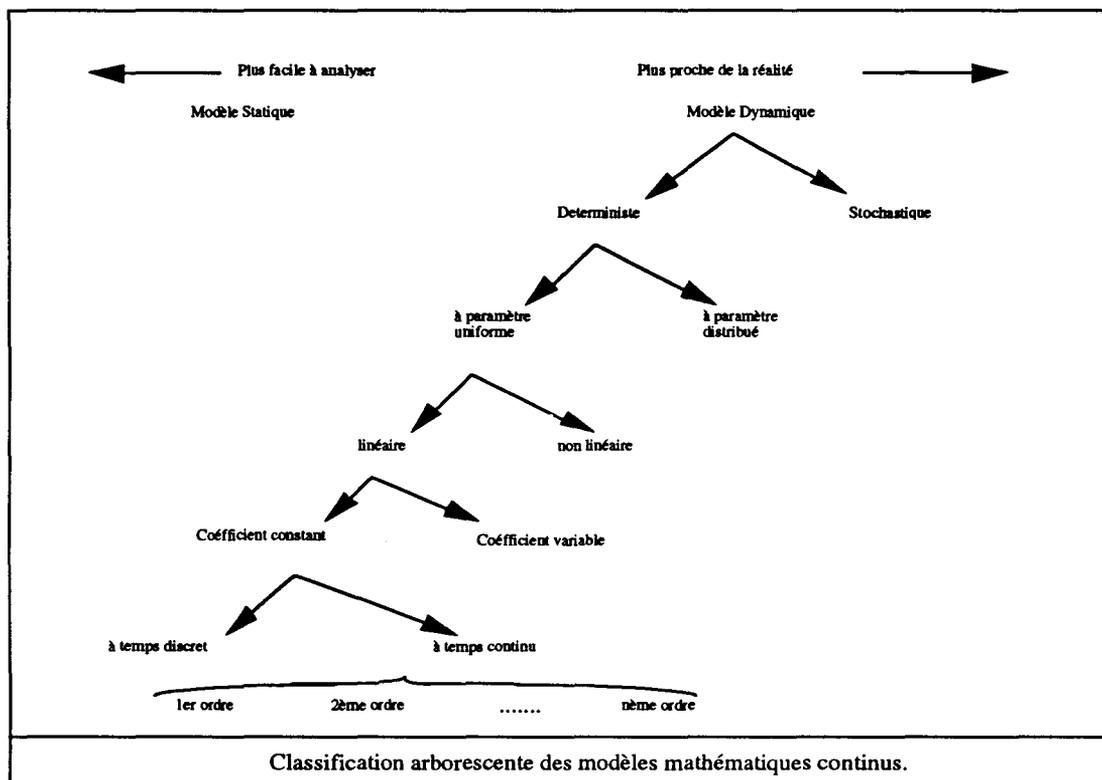
a - d'une part, les **modèles de connaissance**.

Leur caractéristique commune réside dans la construction du modèle qui est élaboré à partir de déduction de modèles plus généraux utilisant les lois de la physique, chimie, biologie, etc. (exemple : bilan de masse, de force, d'énergie,...). Plus proche des réalités "physiques" du procédé, la pratique de ce modèle nécessite, par contre, une parfaite connaissance du processus.

b - d'autre part, les **modèles de représentation** soit par :

- * **modèles entrées-sorties** qui correspondent à des représentations transformationnelles des variables d'entrées ($u(t)$) en sorties ($y(t)$) de type boîte noire. Une relation de type équation de transfert (cas système monovarié) ou à base de matrice de transfert (cas multivarié) lie les deux variables du système.
- * **modèles à équations d'états**. Ces modèles prennent en compte les variables d'entrées et de sorties, ainsi que les variables internes du système (composantes du vecteur d'état). Leur intérêt majeur est de renseigner sur le nombre maximum de variables indépendantes à mesurer ou à reconstruire pour une meilleure contrôle de l'évolution du système. La dynamique du vecteur d'états ($x(t)$) peut être décrite par :
 - i - un système d'équations différentielles (temps continu), d'équations aux dérivées partielles (systèmes à paramètres distribués),
 - ii - un système d'équations aux différences (temps discrets) qui tiennent compte des conditions initiales (à t_0 , $x(t_0)=x_0$), de la loi de commande d'entrée u , du temps t .

Le diagramme suivant présente un résumé des relations existantes entre les différents types de modèles mathématiques continus classiquement utilisés.



A.I.3.2 - Modèles de représentation des Systèmes à Événements Discrets

a - Réseau à files d'attente [WAL88].

Ce type de modèle est utilisé dans des études d'évaluation de performances (temps d'attente, temps moyen de séjour d'une pièce dans l'atelier, temps d'activité d'une ressource, fréquence d'utilisation d'une ressource, recherche de goulot d'étranglement, etc) pendant un fonctionnement en régime permanent. Un système de production est modélisé par deux objets :

- * le serveur proposant un service,
- * et la file d'attente, liste de clients demandeurs de service. L'état instantané du système est décrit par le nombre de clients en attente ou en service. Le changement d'état s'évalue par des fonctions probabilistes établies à partir de la connaissance des durées des services proposés par les serveurs, la fréquence d'arrivée des clients.

b - Modèles par algèbre min-max, algèbre des dioïdes [COHE85].

Ces modèles sont surtout utilisés pour évaluer de manière formelle soit :

- des performances temporelles (évaluation des dates d'occurrence d'événements (max,+)),
- des sollicitations de ressource par comptage d'événements (min,+)).

Pendant son utilisation reste limitée à des systèmes à graphes d'événements simples et sans conflit.

c - Les modèles logiques

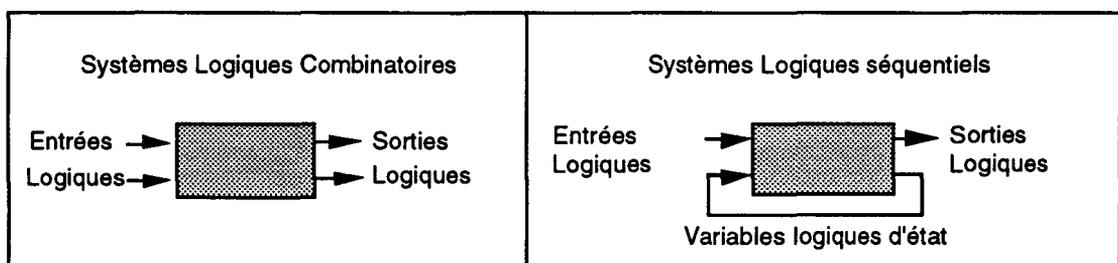
Ces modèles sont utilisés pour décrire les systèmes dont les attributs caractéristiques sont les entrées et sorties de type logique (représentables par des variables binaires). On distingue principalement deux classes de systèmes :

- les systèmes combinatoires pour lesquels les sorties ne dépendent que des entrées :

$$\text{sorties} = f(\text{entrées, temps});$$

- les systèmes séquentiels pour lesquels la production des sorties à partir des entrées nécessite des données sur l'état interne du système :

$$\text{sorties} = f(\text{entrées, état, temps}) ;$$



Les modèles de représentation de ces systèmes peuvent être regroupés selon des points de vue particuliers de description de comportement :

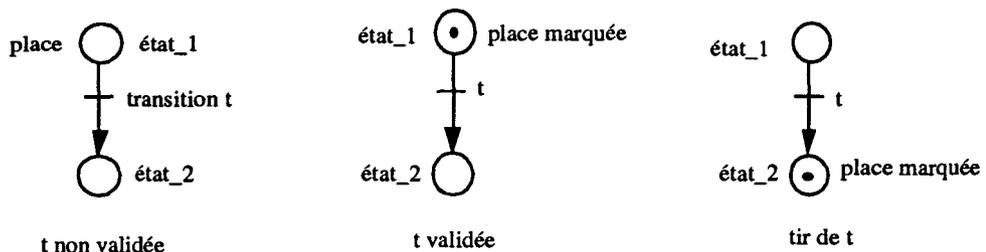
- vue logique proprement dit. Exemple d'outils de modélisation : équations logiques, logigramme, ...,
- vue temporelle. Chronogramme, équation temporelle,
- vue technologique. Diagramme en échelle,
- vue fonctionnelle et causale. Réseaux de Pétri, Grafcet, Automates finis, Langages Synchrones, etc.

* Réseaux de Pétri (RdP) [BRAM83]

Issus des travaux de C. A. Pétri sur la description des relations entre conditions et événements, les RdP permettent de modéliser les comportements des systèmes à événements discrets. Ses principaux atouts reposent avant tout sur une description graphique du **parallélisme**, de la **concurrence**, de la **synchronisation** et de la **partage de ressources communes**. Un RdP comporte deux types de nœuds :

- la place, graphiquement représentée par un cercle,
- la transition, représentée par un trait.

Les places et les transitions sont reliées par des arcs orientés. Les places permettent de représenter différents états du système à modéliser. Les transitions peuvent comporter les conditions d'évolution du graphe. Le comportement du graphe est alors caractérisé par le tir des transitions validées qui fait évoluer l'état des places en modifiant les marques.



Evolution d'état d'un système modélisé par RdP.

Le modèle est utilisé pour la conception de systèmes de commande et leurs validations. Le système modélisé peut être analysé sur l'activité du réseau obtenu. La validation peut s'effectuer par la vérification des propriétés telles que :

- la vivacité : tous les états du réseau sont atteignables.
- l'absence de blocage.

La transposition du modèle obtenu vers un modèle implantable (ex : traduction en Grafcet) est possible [CRAY88] pour des réseaux qui respectent certaines propriétés [NUSS88] :

- réseau Sauf.
- inexistence de boucle (une place ne sert pas à la fois de place d'entrée et de sortie à une transition).
- temps de transition entre deux états est infiniment petit.
- les entrées restent invariants pendant le régime transitoire.

L'introduction de nouveaux concepts tels que la structuration, la notion de durée, structure de données pour palier les limitations du réseau initial (exemple : explosion, ...) a conduit à des extensions de RdP :

- **Les RdP Structurés** [BOUR88] où un système complexe est décomposé en un ensemble de graphes de processus simples constitués de primitives élémentaires (actions, structure répétitive et alternative). Ces graphes de processus sont reliés par des graphes de liaison modélisant les relations d'exclusion mutuelle, de synchronisation, de type producteur/consommateur.
- **Les RdP Temporisés** [CHRE83] qui introduisent la notion de durée d'une opération ou d'un état associé aux transitions (RdP T_temporisées) ou au niveau des places (RdP P_temporisées).
- **Les RdP Colorés** [CORB85] offrent la possibilité d'avoir un modèle plus concis. Une marque représente une classe d'objets (une couleur) et les transitions comportent les conditions de transformation des couleurs.

* **Grafcet** [GRAF92]

Le Grafcet permet d'exprimer les comportements déterministes d'un système logique séquentiel. Le modèle est une représentation graphique normalisée qui comprend :

- des étapes représentées graphiquement par des carrés portant les actions associées,
- des transitions qui représentent les conditions d'évolution du graphe,
- des liaisons orientées reliant les étapes et les transitions.

Domaines d'application.

Le Grafcet est un outil adapté à différents niveaux de spécification d'automatisme séquentiel :

- spécifications fonctionnelles sans présumer des choix technologiques de réalisation,
- spécifications opérationnelles en intégrant les contraintes technologiques de la partie opérative (capteurs, actionneurs, pré-actionneurs).

Il est aussi un outil d'implémentation directe proposée par bon nombre d'outils S.A. et d'automates programmables. Par contre, il est inadapté à la description des systèmes purement combinatoires, à la description structurelle du système et, insuffisant pour une représentation explicite de l'évolution temporelle continue.

* AUTOMATES A ETATS FINIS.

Ce sont des outils de modélisation graphique de comportement individuel sur un nombre fini d'états discrets d'une entité ou de ressource commandable simple. La modélisation est limitée à la description séquentielle du comportement : une seule étape active à la fois. Ils sont souvent utilisés pour des fonctions de filtrage soit de sécurité soit de commandes fines pour tenir compte l'état instantané de la ressource.

* STATECHARTS [HARE87].

Les statecharts sont des extensions des automates finis. Ils décrivent l'évolution d'un système en terme d'états discrets, de transitions et d'événements. Les événements sont des signaux qui sont diffusés à l'ensemble du système et sont reçus instantanément par toutes les transitions. Ils provoquent dans ce sens l'évolution du modèle au moment même de l'émission. Le temps d'émission/réception nul caractérise le synchronisme du modèle.

Ils offrent la possibilité de décomposer en niveaux hiérarchiques (décomposition en sous-états) les états représentés par les places (hyper-états). La notion d'orthogonalité permet de spécifier le parallélisme des sous-états constituant un hyper-état.

L'atout des StateCharts repose sur le formalisme graphique plus compréhensible lors de la spécification des systèmes réactifs. Le raffinement en sous-états explique le comportement du système dans un état donné. L'abstraction en hyper-états permet de définir les états principaux de l'évolution d'un système. Le modèle spécifié peut être simulé et validé grâce à l'aspect formel de la description.

* LANGAGES SYNCHRONES [BENV91]

La réactivité du S.A.P à répondre aux sollicitations de la partie opérative assure l'adéquation des commandes émises au contexte de fabrication. Le respect des contraintes de temps de réponse sévère détermine l'aspect réactif du système contrôle-commande.

L'approche synchrone d'un système réactif repose sur le principe de réaction instantanée à tout événement externe en un temps de réponse nul. Le temps de réaction nul différencie cette approche de l'approche asynchrone où l'activité principale du système consiste en la production des sorties en fonction des entrées avec un temps de transformation conséquent. Cette hypothèse de départ garantit alors le comportement déterministe qui fait défaut à l'asynchronisme, source de perte d'événements et de contexte de réponse.

Les langages synchrones peuvent être des outils de spécification de systèmes à forte contrainte de temps. Il garantit dans ce cas l'obtention d'un programme exécutable conforme à la spécification. Par contre, des limitations sont senties quant à leur utilisation pour une application de dimension industrielle :

- impossibilité d'une implémentation répartie.
- difficulté d'avoir des signaux valués riches en informations.
- une limitation au niveau de vitesse de calcul et d'encombrement mémoire.

Cas d'ESTEREL [BERR87].

Esterel permet de spécifier de manière explicite le temps multiforme et discret. Le langage repose sur le concept d'événement correspondant à la diffusion de signaux. La réception / émission de signaux ne prend pas de temps. Il offre des instructions impératives (boucle, appel de procédure, constructeur de séquencement et de parallélisme, ...), instructions temporelles (attente, temporisation, ...) et de manipulation de signaux (émission, réception de signaux). La compilation du programme produit un automate à états finis (de type machine de MEALY) qui correspond à un programme séquentiel équivalent au programme initial.

Définitions formelles des Réseaux de Petri.

Définition 1 :

Un réseau de Pétri est quadruplet $R = \langle P, T; \text{Pré}, \text{Post} \rangle$ où
 P est un ensemble fini de places pour lesquels on note $m = |P|$,
 T est un ensemble fini de transitions, disjoint de P pour lequel on note $n = |T|$,
 $\text{Pré} : P \times T \rightarrow \mathbb{N}$ est l'application d'incidence avant,
 $\text{Post} : P \times T \rightarrow \mathbb{N}$ est l'application d'incidence arrière,

Définition 2 :

Un réseau marqué est le couple $N = \langle R; M \rangle$ formé d'un réseau R et d'une application $M : P \rightarrow \mathbb{N}$ appelée marquage. $M(p)$ est le marquage de la place p , on dit aussi le nombre de marques contenues dans p .

Définition 3 :

Un graphe $G = \langle P, T; \lceil, \rceil, V \rangle$ associé au réseau $R = \langle P, T; \text{Pré}, \text{Post} \rangle$ est défini par :

$$\forall p \in P \quad \lceil(p) = \{ t \in T / \text{Pré}(p, t) > 0 \}$$

$$\forall t \in T \quad \rceil(p) = \{ p \in P / \text{Post}(p, t) > 0 \}$$

et

$$\forall p \in P, \forall t \in T, V(p, t) = \text{Pré}(p, t) \text{ et } V(t, p) = \text{Post}(p, t).$$



Définition 4 :

Une transition t est **franchissable** pour un marquage M si et seulement si $\forall p \in P$, $M(p) > \text{Pré}(p,t)$.

Si t est franchissable pour M , le franchissement de t permet d'obtenir le nouveau marquage M' tel que :

$$\forall p \in P, M'(p) = M(p) - \text{Pré}(p,t) + \text{Post}(p,t).$$

Les Réseau de Pétri Continus

Définition :

Un RdP continu à vitesses constantes (RdPCC) est un sextuplet

$$R = \langle P, T, V, \text{Pré}, \text{Post}, M_0 \rangle,$$

les définitions de $P, T, \text{Pré}, \text{Post}$ sont identiques à celles des RdP discrets.

V est une application de l'ensemble T des transitions de R dans l'ensemble des nombre $\mathbb{R}^+ \cup \{\infty\}$. La vitesse $V(t_j) = V_j$ correspond à la vitesse maximale de franchissement de la transition T_j

M_0 est le marquage initial du RdP continu. C'est un vecteur de nombres réels positifs ou nuls que l'on peut noter $M_0 = M(0)$.

Les Réseaux de Petri hybrides.

Définition des Règles de tir.

L'évolution du modèle RdP hybride est régie par des règles de franchissement de chaque type de transition existant dans le réseau :

- une C_transition validée T_j est tirée dès qu'on a les deux conditions suivantes :

a - pour les D_places P_i en amont : $m(P_i) \geq \text{Pré}(P_i, T_j)$,

b - pour les C_places P_i en amont : $m(P_i) > 0$.

- une D_transition validée est tirée si les marquages des places en amont (D_places ou C_places) sont supérieurs ou égaux au poids des arcs de jonction :

$\forall P_i$ une place en amont de la D_transition T_j , $m(P_i) \geq \text{Pré}(P_i, T_j)$.

Le franchissement ajoute $\text{Post}(P_k, T_j)$ quantité de marque à chaque place P_k en aval.

GRAF CET : RÈGLES D'ÉVOLUTION

règle 1 - la situation initiale caractérise le comportement initial du graphe. Elle correspond aux étapes actives au début du fonctionnement et traduisent généralement un comportement de repos.

règle 2 - le franchissement d'une transition est conditionné uniquement par la validation de la transition (les étapes immédiatement précédentes reliées à cette transition sont actives) et au passage à vrai de la réceptivité associée.

règle 3 - le franchissement d'une transition entraîne simultanément l'activation simultanée 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 une même étape est simultanément activée et désactivée elle reste active.

ANNEXE 2

A.2.1 - Différents types de flexibilité de fabrication.

Deux types de flexibilité peuvent être distingués pour un S.A.P :

- Au niveau du produit à fabriquer :

- + flexibilité de gamme qui traduit l'indifférence de l'ordre d'exécution des opérations de traitement.
- + flexibilité du produit fini qui réside dans la possibilité de fabriquer une nuance de produits différents à partir d'un même produit brut.

- au niveau de la partie opérative :

- + flexibilité d'opérations qui définit la capacité des ressources à proposer des services différents.
- + flexibilité d'affectation montre la possibilité de réaliser le même traitement sur des ressources différentes.
- + flexibilité de routage qui présente des lignes de préparation différentes pour élaborer un même produit.

A.2.2 - Définitions des processus élémentaires des SED.

- *Opérations de Transfert.*

Ces opérations modifient l'état positionnel du produit dans l'espace sans apporter un changement sur son état physique. Exemple : le retournement d'une pièce par un robot, déplacement à partir d'un tampon d'entrée vers un poste d'usinage à l'aide d'un convoyeur, etc.

- *Opérations de Transformation.*

Ces opérations modifient l'état physique du produit. Elles opèrent sur un seul produit et se terminent en libérant un seul produit transformé. Exemples: usinage d'une pièce, lavage d'une pièce, etc.

- *Opérations de Modification de Structure.*

Ce sont des opérations d'agrégation qui associent des objets atomiques ou considérés comme tels pour donner naissance à de nouveaux objets de structure différente (objets

composites). Exemples: assemblage lors d'une opération de soudage, rivetage, vissage, etc.

- Opérations Informationnelles.

Ce sont des opérations de contrôle de qualité du produit. Elles visent à déceler les produits hors normes et à classer les produits jugés conformes. C'est le cas des opérations de métrologie, de triage, etc.

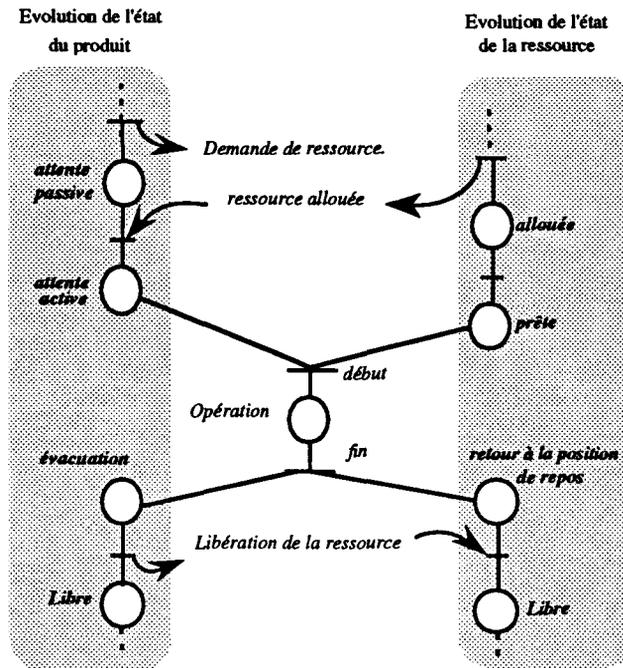
Définition d'une gamme logique

Une gamme logique décrit l'ensemble des opérations élémentaires qui sont à faire subir aux produits bruts initiaux pour obtenir le produit fini. Cette description fonctionnelle du processus de fabrication fait l'abstraction totale des moyens de production du procédé. De ce fait, elle ne tient compte ni des contraintes opérationnelles ni des lieux physiques de traitement ni ceux de stockage. L'information principale véhiculée est la contrainte d'ordre de réalisation des opérations élémentaires.

A.2.3 - Protocole d'accès à une ressource.

Un protocole d'accès à une ressource est composé, en général, de cinq étapes :

- 1 - Requête de la ressource en vue de son allocation en cas de disponibilité. Le produit est supposé intelligent pour envoyer une demande d'accès. Ensuite il se met en attente passive de l'attribution.
- 2 - Préparation de la ressource allouée. Une fois la ressource attribuée au produit, elle est considérée dans un état avancé. Elle se prépare à la réception du produit, par exemple le robot qui se déplace à vide et se positionne pour prendre une pièce. Le produit est en attente active pendant ce temps.
- 3 - Exécution de l'opération sollicitée. Le produit et la ressource sont solidaires pendant un temps fini.
- 4 - Libération de la ressource en fin d'exécution de l'opération. La ressource retourne vers son état de repos et le produit retrouve son comportement autonome.
- 5 - Phase de disponibilité et d'attente de requête pour une nouvelle allocation. La ressource retrouve alors son autonomie.



Protocoles d'accès à une ressource.

Bien que certaines de ces étapes puissent être omises, à cause de la simplicité de la ressource étudiée par exemple, il apparaît nécessaire de se baser sur une modélisation comportementale aussi fidèle que possible afin de gérer les affectations des ressources aux pièces.

ANNEXE 3 sur l'outil OPERA

A.3.1 - Architecture matérielle du système

a - Poste de conduite et de supervision.

Les principales fonctions du poste de conduite sont réalisées avec différents logiciels dont le point commun est l'accès au procédé par la base de données. Elles regroupent principalement :

* Les fonctions standards telles que :

- La conduite. Elle consiste à visualiser l'état du procédé que l'opérateur peut modifier sur synoptique, sur vue de tendance, de groupes, de séquences, de réglage en intervenant sur les paramètres de régulation à l'aide du clavier.
- La surveillance. Elle consiste en la gestion dynamique des niveaux d'urgence en fonction de l'état du procédé des variables type événement pour assurer un suivi efficace des alarmes.
- La tendance et les historiques : elle restitue l'évolution d'une grandeur analogique sous forme de courbe et les mémorise pendant une durée déterminée.
- La recette. Elle réalise le chargement rapide et en ligne des paramètres correspondant à un nouveau produit.

* des fonctions systèmes. Elles concernent la configuration de l'imagerie, la programmation des applications, le téléchargement des programmes exécutables vers l'automate C500, la sauvegarde des configurations (programmes, valeurs d'initialisation et système).

* des fonctions spécifiques qui concernent la supervision.

b - Automate régulateur Alspa ZS C500 .

Le fichier exécutable par l'automate résulte de la compilation de trois types de fichiers. Un premier fichier contient la description en langage ARC l'automatisme à appliquer. Les deux autres fichiers sont obtenus en utilisant les logiciels suivants :

Configuration des IPs.

Le fichier de données de configuration est obtenu par un logiciel de définition des caractéristiques de chaque IP. Ces informations sur un IP concernent outre son repère géographique dans l'armoire de commande, son type, numéro, nature du signal

transmit, le nom de chaque voie, adresse de l'IP sur le bus entrées-sorties distribué par l'unité de traitement UT de l'automate, la redondance, le calibrage en fonction de la nature du signal.

Configuration des valeurs d'initialisation.

Ces informations sont utilisées pour compléter le fichier des variables ARC par écriture des valeurs d'initialisation dans les champs réservés à cet effet. Cette opération s'accompagne d'une définition du temps de cycle de scrutation du programme automate. Initialiser une variable ARC consiste à définir sa valeur par défaut et ses attributs. Ceux-ci peuvent être définis , par exemple, de : directe ou inverse, normée ou non, plage de variation souhaitée, valeurs min-max, etc.

ANNEXE 4 sur les systèmes batchs

A.4 - DEFINITION DES TERMONOLOGIES

Nous proposons de rappeler ici les définitions attribuées aux termes usuellement employés pour caractériser le procédé et l'automatisation des systèmes batchs.

Systèmes batchs : ce terme désigne les systèmes industriels de production où le produit est élaboré lot par lot. Il est aussi synonyme de systèmes de production à traitement par lots.

Lot : ce terme signifie une quantité finie de matières qui représentent le produit de manière virtuelle quand les matières sont réparties dans des réservoirs différents (au début de cycle de fabrication) ou de façon atomique quand elles sont localisées dans une unité physique (souvent en fin de cycle de fabrication).

Cycle de fabrication : il représente le laps de temps pendant lequel un lot est préparé.

Campagne : ce terme regroupe l'ensemble de lots d'un même produit qui sont préparés de manière consécutive. Les lots d'une campagne sont élaborés suivant une même recette.

Recette : elle se rapporte à une description de haut niveau mais complète de la fabrication d'un produit. Il comporte essentiellement des spécifications sur la définition du produit et la procédure de fabrication. La définition du produit détaille les informations et les paramètres relatifs à son élaboration. Citons des éléments classiques de définition d'un produit :

- une liste des ingrédients qui vont former le produit final.
- les valeurs quantitatives de composition de chaque ingrédient (dosages).
- une formule chimique de réaction si possible.
- les valeurs des paramètres de réglage des opérations de transformation (consignes, profil, seuils, délais d'attente, temps d'exécution, etc.).
- les paramètres sur les conditions de qualité du produit tels que les valeurs de tolérances, les contraintes d'hygiène et de propreté pour les produits alimentaires.

- les paramètres sur les conditions de sécurité à respecter qui sont d'une priorité absolue dans la manipulation des produits inflammables, toxiques, nocifs ou explosifs.

Procédure : elle désigne la séquence connue de phases opératoires à réaliser pour le traitement d'un produit.

Phase : ce terme signifie un sous-ensemble d'opérations élémentaires ordonnées séquentiellement et/ou parallèlement. Ce groupement d'opérations est souvent orienté "unité physique" ou "objectifs". Dans le premier cas, une phase regroupe les opérations à effectuer sur une même unité physique de la partie opérative. Dans le second cas, ce sont les opérations contribuant à l'apport de valeur ajoutée notable (transformation physique ou chimique) au produit qui composent une phase. Une phase peut être aussi synonyme d'"étape".

Opération : elle signifie l'action élémentaire qui peut être de nature continue (régulation de température, pression ou niveau) ou de nature logique (ouverture ou fermeture d'une vanne tout ou rien) mais considérée comme atomique et de temps d'exécution finie.

Unité : ce terme désigne chaque équipement physique de la partie opérative. On remarque principalement :

- des réservoirs de stockage, des silos,
- des dispositifs de pesage,
- des unités de transformation telles que les réacteurs, colonne de distillation, cuve de fermentation, de filtrage, de mélange, de centrifugation,
- des unités annexes qui fournissent des services nécessaires au fonctionnement des unités de transformation ; exemple : dispositifs de nettoyage, d'alimentation en énergie.

Éléments de transfert : ils comportent les objets physiques qui associent leurs services pour déplacer la matière d'une unité à une autre. Ils comprennent les réseaux de tuyauterie de canalisation, tapis roulants, les pompes, les vannes et les débitmètres.

Lignes de fabrication : ce terme regroupe les unités et les éléments de transfert qui interviennent dans la fabrication et l'acheminement des produits. Elles représentent les

chemins réels empruntés par des flux de produits dans un atelier de fabrication.

BIBLIOGRAPHIE

BIBLIOGRAPHIE

- [ABC92] "Advanced Batch Control system software simplifies automation projects", M. VAN BERGEIJK, Rosemount Benelux, Journal A, vol 33, n°1, 1992.
- [ADEP79] ADEPA, "Le GEMMA : guide des modes de marche et d'arrêt", 1979.
- [ADPM92] Automatisation des Processus Mixtes, Actes du congrès ADPM'92, AFCET/SEE, Paris, 29-30 jan 1992 et Rapport du groupe de travail AFCET/SEE
- [AKA89] AKAMATSU N. et al, "Batch sequence control using a distributed control system with a coordinator station", IFAC Dynamic and Control of Chemical Reactors (DYCORD+'89), Maastrich, The Netherlands, 1989.
- [AMAR92] AMAR S., CRAYE E., GENTINA J.C., "Une méthode hiérarchique de spécification et de prototypage des systèmes de production flexibles", APII, vol 26, pp 483-514, 1992.
- [BAIL91] Le BAIL J., DAVID R., ALLA H., "Hybrid Petri nets", ECC Grenoble Juin 1991.
- [BAUD88] BAUDOT W.E., "CIM at Dunlop's rubber-mixing mill ", Journal A, vol 29, n° 3, 1988.
- [BELH89] BELHIMEUR A., "Contribution à l'étude d'une méthode de conception des automatismes des systèmes de conduite des processus industriels", thèse de doctorat, Université de Sciences et Techniques de Lille I, 1989.
- [BENA87] J. BENASSY J., "La gestion de Production", Editions Hermès, 1987.
- [BENV91] BENVENISTE A., GERRY G., "Special Section on Another Look at Real-Time Programming", Proceedings of the IEEE , vol 79, n°9, Sept 1991, pp 1268-1336.
- [BERR87] BERRY G., COURONNE Ph., GONTHIER G., "Programmation synchrone des systèmes réactifs : le langage ESTEREL", TSI, n°6, pp 305-316, 1987.

- [BHAL90] BHALY, "Boucles de régulation : étude et mises au point", KIRK éditions, collections industries, 1990.
- [BRAMS] BRAMS G.W., "Réseaux de Pétri : Théorie et Analyse", tome 1, éditions Masson, 1986.
- [BRIST85] BRISTOL E. H., "A design tool kit for batch process control : Terminology and a Structural Model", The Foxboro Co, InTech Octobre 1985.
- [BOIS91] BOIS S., "Intégration de la gestion des modes de marche dans la commande d'un atelier flexible", thèse de doctorat, Université des Sciences et Techniques de Lille I, novembre 1991.
- [BORN91] BORNE P., "Modélisation et Identification des processus", tome 1, Edition TECHNIP, 1991.
- [BOU87] BOURDET J., PONS M.N., "Tendances dans le domaine de la conduite des procédés continus et discontinus", Conférence plénière, 1^{er} congrès français de génie de procédé, Nancy, 1987.
- [BOUF92] BOUFFIOUX A., "Standardisation and flexibility implemented with Batch TM", Siemens, Journal A, vol 33, n°1, pp 35-38, 1992.
- [BOUR88] BOUREY J.P., "Structuration de la partie procédurale du système de commande de cellules de production flexibles dans l'industrie manufacturière", thèse de doctorat, Université des Sciences et Techniques de Lille I, mars 1988.
- [BOW75] BOWEM H.C., GHOSH A, McGRATH A., and ROGERSON P., "User-oriented languages on a batch plant", Trends in On-line computer control systems, Conference Publication n° 127, April, Institution of Electrical Engineers, Herts, England, pp 154-161, 1975.
- [BROW87] BROWN P. F. , Mac LEAN C.R. , "The architecture of NBS factory automation research testbed", IFAC 87, Munich, 1987. (NBS : National Bureau of Standard).

- [CALV90] CALVEZ J.P, "Spécification et conception des systèmes : une méthodologie", Editions Masson, 1990.
- [CAS87] CASTELAIN E., "Modélisation et simulation interactive de cellules de production flexibles dans l'industrie manufacturière", Thèse de doctorat, Université des Sciences et Techniques de Lille I, 1987.
- [CCGA] CCGA, "Modèle Conceptuel BASE_PTA, Cartes d'Activités de développement d'un S.A.P, Standard d'échange", Publication du Centre Coopératif de Génie Automatique, (3 rue Fernand Hainaut,) Saint OUEN.
- [CHLI91] CHLIQUE P., QUENEC'H DU Y., DOUBLE L., LEMAIRE E., "Automatisation des Processus Batches", Colloque bilan A2RP, 15-16 janvier 1991.
- [CHRE83] CHRETIENNE Ph., "Les réseaux de Pétri Temporisés", Thèse d'état, Université de Paris VI, juin 1983, .
- [CLOU92] CLOUTHER S. F. , "BaseStar : The integration Platform for a CIM Environment", IEEE International WorkShop on Emerging Technologies and Factory Automation, Melbourne, Australie, Août 1992.
- [COHE85] COHEN G, DUBOIS D, QUADRAT J.P., VIOT M, "Analyse du comportement périodique de systèmes de production par la théorie des dioïdes", rapport de recherche de l'INRIA, n°191, 1985.
- [COLL85] COLLERY R., "Spécification d'outils graphiques destinés à la mise en œuvre d'applications de régulation sur automate programmable industriel", Thèse de docteur ingénieur, Institut Industriel du Nord, 1985.
- [CONT90] Contrat A.P.C, Rapport d'étude final DCB-CEGELEC et ADERSA sur "Outil de Production d'Etude et Réalisation d'Automatismes", 18 juin 1990.
RAKOTOSON M., VERCAUTER C., GENTINA J.C.
- [CORB85] CORBEEL D., VERCAUTER C., GENTINA J.C., "Application of an extension of Petri nets to modelization of control and production processes", 6th European Workshop on application and theory of Petri nets, pp 53-74, juin 1985.

- [CRAY88] CRAYE E., "De la modélisation à l'implantation automatisée de la commande hiérarchisée de cellules de production flexibles dans l'industrie manufacturière", thèse de doctorat, Université des Sciences et Techniques de Lille I, janvier 1989.
- [CRU91] CRUETTE D., "Méthodologie de conception des systèmes complexes à événements: application à la conception et la validation hiérarchisée de la commande des cellules flexibles de production dans l'industrie manufacturière", thèse de doctorat, Université des Sciences et Techniques de Lille I, fev 1991.
- [DAVI89] DAVID R., ALLA H. "Du grafcet aux Réseaux de Petri", ed. Hermès, Paris, 1989.
- [DAVI91] DAVID R., "Modeling of dynamic systems by Petri nets", ECC Grenoble, Juin 1991.
- [DECW88] VMS DEC Windows Reference Manual and Guide to application Programming, Digital, Juillet 1988.
- [DEST91] DESTENAVE G., "Les spécificités de l'automatisation dans l'industrie Agro-alimentaire", Journée SEE sur l'automatisation dans les IAA, Grenoble, 18 av 1991.
- [DOM83] DOUMEINGTS G., BREUIL D., PUN L., "La gestion de Production Assistée par Ordinateur", Editions Hermes, 1983.
- [DPS50] Système ZS, Manuel de programmation de l'automate C500, DPS50604 aF, CGEE ALSTOM.
- [DUB85] DUBOIS D., BEL G., "Modélisation et Simulation de systèmes automatisés de production", APII, vol 19, n°1, 1985, pp 4-43.
- [DUF92] DUFRESNE Th., "Guide méthodologique de l'atelier X TEL", RGE, n°4, pp 36-40, avril 1992.
- [EXER90]. EXERA, "Systèmes Automatisés de Production : guide d'analyse des besoins (aide à la conception)", S3561X90, ISMCM et SPC Consultants.

- [FLEXI91] "FLEXIBATCH ou la maîtrise complète par l'exploitant des séquences de fabrication", R. JOST, service applications chimie, verre, CEGELEC - Division Contrôle Bailey, Présentation congrès Mesucora 91, session n°8.
- [FORM91] FORMOND V., "Le diagnostic process pris en compte dès la conception : une meilleure efficacité", Congrès Mesucora 91, session n°8 sur la supervision et son développement, Société April.
- [GIBS91] GIBSON N., "Batch process safety", CE, mai 1991, pp 121-128.
- [GAS89] GASNIER B., "Sur un outil interactif de spécification de gammes opératoires en production flexible manufacturière", thèse de doctorat, Université des Sciences et Techniques de Lille I, janvier 1989.
- [GKS88] VAX Graphic Kernel Systems V3.0, Reference Manual Volume I, II, mars 1988.
- [GRAF92] "Le Grafcet", Automatisation et Production, ADEPA et AFCET, Cépadues Edition, 1992.
- [GUID85] GUIDO R. Carlo-STELLA, "Modular hierarchical approach for distributed batch systems", Journal A, vol 26, n°3, pp 137-145, 1985.
- [GUID92] GUIDO R. Carlo-STELLA, "Towards standards and guidelines in batch process automation", Journal A, vol 33, n°1, pp 7-11, 1992.
- [HAM91] HAMMADI S., "Une méthode d'ordonnancement minimisant les temps d'attente et de transit dans les systèmes de production flexibles de type job-shop", thèse de doctorat, Université de Lille I, nov 1991.
- [HARE87] HAREL D., "STATECHARTS : A visual formalism for complex systems", Science of Computer Programming n°8, pp 231-274, 1987.
- [HUVE92] HUVENOIT B., CRAYE E., GENTINA J.C., "Elaboration de la commande de cellules de production flexibles dans l'industrie manufacturière", Conférence Canadienne et Exposition en Automatisation Industrielle, AIAI, vol 1, 1-3 juin 1992.

- [ISA73] "Instrumentation Symbols and Identification", S5.1, Instrument Soc. of America ISA, Research Triangle Park, N.C, 1973.
- [HO89] HO Y.C, "Scanning the issue : Dynamics of Discret Event Systems", Proceedings of the IEEE, vol 77, n°1, janv 1989.
- [JALL90] JALLUT C., GILLES G., "Automatique, productique et procédés chimiques discontinus : Automatisation de procédé batch", RGE, n°6, juin 1990.
- [JOUA92] JOURNAL A, "Feature Issue on Batch Control", vol 33, n°1, mars 1992.
- [JOUR92] Journée de Surveillance LAIL / (EC Lille & AREMI), 23 Janv 92.
- [KAP88] KAPUSTA M., "Une première étape de conception assistée du modèle de la partie commande de cellules flexibles de production dans l'industrie manufacturière", thèse de doctorat, Université des Sciences et Techniques de Lille I, 1988.
- [KIEF88] KIEFFER J.P., GOUSTY Y., "Une nouvelle typologie pour les systèmes industriels de production", Revue Française de Gestion, Mai, Juin et Juillet 1988.
- [KOHA84] KOHAN D., "The design of interlocks and alarms", CE, fev 20 1984, pp 73-80.
- [LAND84] LANDAU I. D. "Système adaptatifs un tour guidé" colloque CNRS, Commande Adaptative. Aspects théoriques et pratiques. Grenoble, 21-23 nov , 1984.
- [LARI92] LARIVIERE E., "CP2M : Aide à la Conception de Processus de Production Mixte par la simulation", ADPM'92, 29-30 jan 92, CISI engineering.
- [LEMO90] LEMOIGNE J.L., "La modélisation des systèmes complexes", AFCET Systèmes, Dunod, 1990
- [MESU91] Mesucora, Conférence nov 1991 sur le thème de la supervision, sessions n°6, n°8, n°10.
- [MICH92] MICHAUD J.C., SAUVAGET J.C., "La méthode K-SYS : son utilisation par Elf Aquitaine", RGE, n°4, pp 41-45, avril 1992.

- [NUSS88] NUSSBAUMER H. "Informatique Industrielle IV", Presses Polytechniques Romandes, 1988.
- [NYE88] NYE A., "The definitive guides to the X window system : Xlib programming manual" volume 1 et 2, O'Reilly & Associates, Inc, 1988, 1989.
- [OPER90] RAKOTOSON M. P., VERCAUTER C., GENTINA J.C., "OPERA : Outil de Production d'étude et de Réalisation d'Automatisme", Colloque bilan APC 88, CNRS Paris, 13 déc. 1990.
- [OZOG85] OZOG H., "Hazard Identification, Analysis and Control", CE, Février 18, 1985, pp 161-170.
- [PAN92] PANETTO H., LHOSTE P., MOREL G., "SPEX : Prototypage des machines et systèmes automatisés de production", Canadian Conference and exhibition on Industrial Automation, vol 1, pp 5.1-5.4, Montréal, juin 1992.
- [PARK90] PARKINSON G., "Batch process control : to adopt common guidelines", CE, Septembre 1990, pp 30-35.
- [POUR91] POURCEL C., POURCEL P. , "Conduite des procédés continus et manufacturiers : une même approche ?", 3^{ème} congrès international de génie industriel, Tours, mars 1991.
- [PROC91] PROCYK L.M. , "Batch Process Automation : Larger batch plants are ready using distributed control systems", CE, mai 1991.
- [QUEN91] QUENEC'H DU. Y., "Présentation des systèmes dis-continus", rapport de travail année 90-91 du groupe de travail AFCET/SEE sur le thème des systèmes dis-continus.
- [RAK92] RAKOTOSON M.P., VERCAUTER C., GENTINA J.C., "Analyse des systèmes de production continue-discrete et critères de hiérarchisation du niveau coordination/supervision de la commande", ADPM'92, 29-30 janv 1992, Paris, AFCET-SEE et MRT.

- [RAK93] RAKOTOSON M.P., VERCAUTER C., GENTINA J.C., "About one method to design control part of flexible batch process plants", IEEE SMC'93 Conference Le Touquet France, Oct 17-20, 1993.
- [RDB88] Vax Relational DataBase Reference Manual and Guide to interfacing with programming languages, Digital, Décembre 1988.
- [REN92] RENARD F., "Les nouvelles architectures pour la supervision", RGE, n°8, pp 25-30, sept 1992.
- [RICH84] RICHALET J., Journée Automatisation des Processus Continus, A.D.I, Paris-La Défense, 29 novembre 1984.
- [RIJN89] RINJSDORP J.E., "Degree of Automation and work organization for batch process", Journal A, vol 30, n°2, 1989.
- [RIPP91] RIPPIN D.W.T., "Batch Process Schedule : The big advantage offered by batch processing is flexibility. This puts a high premium on effective planning and scheduling", CE, mai 1991, pp 101-107.
- [ROOD89] ROODHUYZEN M., "Guidelines for implementation of Batch Control in DCS", Journal A, vol 30, n°1, 1989.
- [ROSE82] ROSENHOF H.P. "Interunit synchronisation in batch system", Advances in Instrumentation 37 (part 2), pp 863-877, 1982.
- [ROSE87] ROSENHOF H.P., GHOSH A. "Batch Process Automation : Theory and practice", Van Nostrand Reinhold, New York, 1987.
- [ROSS77] ROSS D.T., "Structured Analysis : A language for communicating ideas", IEEE Transactions on software engineering, vol. 3, n°1, 1977.
- [SCHL85] SCHLUNK R.W., de WEERD J. , "Batch Control systems today", Journal A, vol 26, n°3, 1985.
- [SOTO89] SOTO FERNANDEZ L., "Contribution à l'étude des moyens de description et conduite des processus industriels à traitement par lots", Thèse de doctorat de troisième cycle, Université de Renne I, 1989.

- [SPEC89] Spécifications techniques, Contrat APC, "Faisabilité d'un outil de production d'étude et réalisation d'automatismes.",
DCB - CGEE Alstom : BOURNERIE H., PETITJEAN D.
IDN : GENTINA J.C., VERCAUTER C., RAKOTOSON M.P.
- [STAR91] STAROWIESKI M., COCQUEMPOT V., CASSAR J.Ph., "Optimal design of FDI systems via parity space and observer based approaches", IECON'91, KOBE (Japon), oct 1991.
- [TDC92] "TDC 3000 Batch Supervisor", Honeywell, vol 33, n°1, Journal A, mars 1992.
- [TOGU90] TOGUYENI A., CRAYE E., CASTELAIN E., "A method of temporal analysis to perform on-line diagnosis in the context of flexible manufacturing systems", IECON'90, vol 1, Proc. pp. 445-450, Pacific Grove, nov 1990.
- [VALE86] VALETTE V., COURVOISIER M., "Commande des procédés discontinus : logiques séquentielles", Dunod Université, 1986.
- [VALEN93] VALENTIN C., "Contribution à la modélisation et à la conduite des procédés mixtes (continus-discrets) : application à l'industrie papetière", Thèse de doctorat, Institut National Polytechnique de Grenoble, 1993.
- [VER92] VERHAGEN L., "A systematic approach to specifying the control system for batch process plants", Journal A, vol 33, n°1, mars 1992.
- [VaxSQL] VAX Structured Query Language, Manual Reference, Order Number AA-JM32B-TE, DEC, Juillet 1988.
- [WAL88] WALRAND J., "An introduction to queuing networks", Prentice Hall Englewood Cliffs, 1988.
- [WOOD65] WOODWARD J., "Industrial Organisation", Oxford University Press, 1965.

TABLE DES MATIERES

TABLE DES MATIERES

INTRODUCTION GENERALE	11
 CHAPITRE I UNITES AUTOMATISEES DE PRODUCTION ET SYSTEMES DIS-CONTINUS	
I.1 - GENERALITES	15
I.1.1 - Description d'une unité de production - Partie Opérative.....	16
I.1.2 - Description d'un système de conduite - Partie Commande.	18
I.1.2.1 - Evolution de la structure du système de commande	19
I.1.3 - Architecture fonctionnelle d'un S.A.P.....	20
I.1.4 - Démarche de réalisation d'automatisme de conduite	24
I.1.5 - Le Génie "Automatique"	27
I.1.6 - Aspect Surveillance	29
I.1.7 - Aspect Sûreté de Fonctionnement et Evaluation de Performance.....	30
I.1.8 - Conclusion.....	31
I.2 - LES SYSTEMES DIS-CONTINUS	32
I.2.1 - Présentation	32
I.2.2 - Interprétation et sémantiques du Continu et Discret	34
I.2.2.1 - Les Systèmes Continus.....	34
I.2.2.2 - Les Systèmes Discontinus	36
I.2.2.3 - Les Systèmes Evénementiels ou à Evénements Discrets	36
I.2.2.4 - Résumé	38
I.3 - AXES PRINCIPAUX D'ETUDE.....	39
I.3.1 - Problématiques des systèmes dis-continus	39
I.3.2 - Orientation de l'études sur les systèmes DIS -CONTINUS.	40
I.3.2.1 - Systèmes de production hybrides par nature	40
I.3.2.2 - Utilisation d'un modèle mixte pour un système homogène	41
I.4 - ASPECTS DIS-CONTINUS DE LA PARTIE COMMANDE.....	45
I.4.1 - Fonctions d'automatisme continu.	45
I.4.1.1 - Asservissement et Régulation	45
I.4.1.2 - Principes de commande des processus continu	46
I.4.1.3 - Critères de performances des fonctions de régulation.....	48
I.4.2 - Fonctions d'automatisme discret.....	48
I.4.3 - Différents types d'interaction entre automatismes continu et discret	51
I.5 - CONCLUSION	53

CHAPITRE II

CARACTERISATION DES SYSTEMES DE PRODUCTION A ETATS CONTINUS - DISCRETS ET IDENTIFICATION DES STRUCTURES DE COMMANDE

INTRODUCTION.....	55
II.1 - TAXONOMIE DES SYSTEMES DE PRODUCTION.....	56
II.1.1 - INTRODUCTION.	56
II.1.2 - LES SYSTEMES DE PRODUCTION MANUFACTURIERE	57
II.1.2.1 - LE PRODUIT.....	57
II.1.2.1.1 - Principales caractéristiques d'un produit manufacturier	58
II.1.2.2 - MODE ET PROCESSUS DE FABRICATION.....	59
II.1.2.2.1 - Mode de fabrication traitement discontinu du produit.....	59
II.1.2.2.2 - Processus de fabrication.....	60
II.1.2.2.3 - Gammes de fabrication et considérations conceptuelles.....	60
II.1.2.3 - RESSOURCES ET PROCÉDÉ DE FABRICATION	61
II.1.2.3.1 - Ressources de fabrication.....	61
II.1.2.3.2 - Procédé de fabrication	62
II.1.2.4 - DYNAMIQUES DES PRODUITS ET RESSOURCES	63
II.1.2.4.1 - Dynamiques du produit.....	63
II.1.2.4.2 - Dynamiques de la ressource.....	63
II.1.2.4.3 - Interaction entre dynamique du produit et de la ressource	64
II.1.2.5 - MODELE, MÉTHODOLOGIE DE DÉVELOPPEMENT.....	64
II.1.2.5.1 - Modèle d'atelier et classes de commande associées.....	64
II.1.2.5.2 - Méthodologie de conception de la partie commande.....	66
II.1.2.6 - FACTEURS DE COMPLEXITE.....	67
II.1.3 - LES SYSTEMES DE PRODUCTION CONTINUS.....	69
II.1.3.1 - CARACTERISTIQUES DU PRODUIT	69
II.1.3.2 - CARACTERISTIQUES DES PROCESSUS CONTINUS	70
II.1.3.2.1 - Coopération instantanée et dépendante - parallélisme au sens SEC.....	70
II.1.3.2.3 - Processus peu paramétrables.....	71
II.1.3.3 - PROCEDE ET MODE DE FABRICATION.....	71
II.1.3.4 - MODELE ET CONCEPTION DE LA COMMANDE	72
II.1.3.4.1 - Conception de Commande SEC.....	72
II.1.3.5 - FACTEURS DE COMPLEXITE.....	73
II.1.4 - DIFFERENCES ESSENTIELLES ENTRE SEC ET SED.....	74
II.1.5 - LES SYSTEMES DE PRODUCTION A ETATS CONTINUS - DISCRETS	76
II.1.5.1 - Le Produit continu-discret.....	77

II.1.5.2 - La notion de Gamme.....	78
II.1.5.3 - La notion de ressources et lieux physiques élémentaires.....	78
II.1.5.4 - Fabrication et Processus continus-discrets.....	80
II.1.5.5 - Contraintes entre phase SED et phase SEC.....	82
II.1.6 - CONCLUSION.....	83
II.2 - LES SYSTEMES DE PRODUCTION BATCH ET IDENTIFICATION DE LEUR	
COMMANDE.....	85
II.2.1 - PRESENTATION.....	85
II.2.2 - DIFFERENTES ARCHITECTURES.....	86
II.2.3 - COMMANDES DES SYSTEMES BATCHS OU COMMANDES "BATCH".....	88
II.2.3.1 - Caractéristiques dis-continues des commandes batchs.....	89
II.2.3.1.1 - Fonctions de commande continues.....	89
II.2.3.1.2 - Fonctions de commande événementielles.....	92
II.2.3.2 - Besoins spécifiques des commandes batchs.....	98
II.2.3.3 - Spécifications des activités de Coordination/Supervision.....	102
II.3 - EVALUATION DES POSSIBILITES DE TRANSPOSITION.....	108
II.3.1 - Résumé des commandes batchs.....	108
II.3.2 - Réponses pour la conception des commandes intra-ressources.....	109
II.3.4 - Réponses pour la conception des commandes inter-ressources.....	110
II.4 - CONCLUSION.....	111

CHAPITRE III

REALISATION DE COMMANDES INTRA-UNITES

INTRODUCTION.....	113
III.1 - PRESENTATION.....	113
III.2 - SPECIFICATIONS GENERALES DES BESOINS.....	114
III.2.1 - La Problématique.....	114
III.2.2 - Procédure d'étude et de traitement actuel.....	115
III.2.2.1 - Architecture du système.....	115
III.2.2.2 - Le langage ARC.....	117
III.2.2.2.2 - Structure.....	117
III.2.2.2.3 - Syntaxes et Exemple.....	120
III.2.2.3 - Procédure de développement actuelle.....	122
III.2.3 - Les Objectifs.....	124
III.3 - DEMARCHES ET CONCEPTS DE REALISATION.....	125
III.3.1 - Procédures d'acquisition des spécifications.....	128
III.3.1.1 - Spécification du procédé.....	128
III.3.1.2 - Spécification de l'organisation système.....	131
III.3.1.3 - Spécification des modules de traitement.....	133
III.3.1.3.1 - Principes.....	133
III.3.1.3.2 - Les Objets de spécification d'un MBA et MBR.....	135
III.3.1.3.3 - Construction des modules MBT ou MST.....	138
III.3.1.3.4 - Spécification des valeurs d'initialisation.....	141
III.3.2 - Procédure de génération de codes ARC.....	142
III.4 - PRESENTATION DE L'OUTIL OPERA.....	145
III.4.1 - Structure générale.....	145
III.4.2 - Présentation de la procédure "PA - Description procédé".....	146
III.4.3 - Présentation de la procédure "PB - Organisation système".....	149
III.4.4 - Présentation de la procédure "PC - Génération de Modules".....	152
III.4.5 - Présentation de la procédure "PD - Génération de programmes".....	154
III.4.6 - CONCLUSION SUR L'OUTIL OPERA.....	155
III.5 - CONCLUSION SUR LE LANGAGE ARC ET SYSTEMES DIS-CONTINUS.....	157

CHAPITRE IV

**PROPOSITION D'UNE METHODE DE CONCEPTION DES COMMANDES
INTER-RESSOURCES BATCHS**

INTRODUCTION	160
IV.1 - CONTEXTE ET HYPOTHESES DE TRANSPOSITION.....	160
IV.1.1 - CASPAIM : Contexte, Hypothèses et Objectifs.....	160
IV.1.2 - Bases de la transposition.	161
IV.1.3 - Eléments divergents et Hypothèses.	162
IV.1.4 - Architecture globale et démarche transposée de conception.....	163
IV.2 - PRESENTATION DETAILLEE DE LA DEMARCHE.....	165
IV.2.1 - Phase de spécification.	165
IV.2.1.1 - Modélisation de la partie opérative.	165
IV.2.1.1.1 - Définition d'une RPE.....	165
IV.2.1.1.2 - Modèle d'une RPE.....	166
IV.2.1.1.3 - Notion de Ressources Physiques à Configuration Dynamique	169
IV.2.1.2 - Modélisation de la commande "produit ou lot".....	170
IV.2.2 - Génération de la procédure opératoire.....	172
IV.2.2.1 - Etape 1 : Intégration des RPEs	173
IV.2.2.2 - Etape 2 : Insertion des RPDs de transfert.....	174
IV.2.3 - Génération de la Procédure Opératoire Etendue (POE).....	175
IV.2.4 - Allocateur de ressources	178
IV.2.4.1 - Spécification fonctionnelle.....	178
IV.2.4.2 - Types de décisions envisageables	179
IV.2.4.3 - Implantation centralisée et répartie	182
IV.3 - CONCLUSION ET PERSPECTIVES	183
CONCLUSION GENERALE.....	186
ANNEXE.....	189
ANNEXE 1	188
ANNEXE 2	201
ANNEXE 3 sur l'outil OPERA.....	204
ANNEXE 4 sur les systèmes batchs	206



BIBLIOGRAPHIE 210

TABLE DES MATIERES 220

