

N° d'ordre : 1301

50376  
1994  
129

50376  
1994  
129

# THESE

présentée à

**L'UNIVERSITÉ DES SCIENCES ET  
TECHNOLOGIES DE LILLE**

pour obtenir le grade de

**DOCTEUR DE L'UNIVERSITÉ**

Spécialité Productique,

Automatique et Informatique Industrielle

par

**Slimane AMAR**

Maître en Productique et Mastère IDN

-----

**SYSTÈMES AUTOMATISÉS ET FLEXIBLES DE  
PRODUCTION MANUFACTURIÈRE :  
MÉTHODE DE CONCEPTION DU SYSTÈME DE  
COORDINATION PAR PROTOTYPAGE ORIENTÉ OBJET DE  
LA PARTIE PROCÉDÉ**

-----

Soutenue le 14 avril 1994 devant la Commission d'Examen

Membres du jury :	MM	B. DESCOTES-GENON	Rapporteur
		G. MOREL	Rapporteur
		J. C. GENTINA	Examineur, Directeur de Thèse
		E. CASTELAIN	Examineur, Directeur de travail
		E. CRAYE	Examineur, Directeur de travail
		M. STAROSWIECKI	Examineur, Président du jury
		J.L. DELCUVELLERIE	Examineur, Invité

Thèse préparée au Laboratoire d'Automatique et d'Informatique Industrielle de Lille (LAIL)  
URA-CNRS D 1440, ÉCOLE CENTRALE DE LILLE



## REMERCIEMENTS

*Le travail présenté dans ce mémoire a été effectué au Laboratoire d'Automatique et d'Informatique Industrielle de Lille (LAIL) à l'Ecole Centrale de Lille (EC Lille) sous la direction scientifique de Monsieur le Professeur J.C. GENTINA, Directeur de l'EC Lille. Je tiens à le remercier vivement pour son accueil ainsi que pour la confiance et les précieux conseils dont j'ai bénéficié tout au long de ce travail.*

*Je tiens également à remercier :*

- Monsieur M. STAROSWIECKI, Professeur à l'Université de Lille I,*
- Monsieur E. CASTELAIN, Maître de Conférence à l'EC Lille,*
- Monsieur E. CRAYE, Maître de Conférence à l'EC Lille,*

*pour l'honneur qu'ils me font en examinant ce travail et en acceptant de participer à mon jury de Thèse.*

*Je suis très reconnaissant à :*

- Monsieur B. DESCOSTES-GENON, Professeur à l'Université de Grenoble et membre du Laboratoire d'Automatique de Grenoble (LAG),*
- Monsieur G. MOREL, Professeur à l'Université de Nancy I et membre du Laboratoire d'Automatique et de Commande Numérique (LACN) au Centre de Recherche en Automatique de Nancy (CRAN),*

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

*Je suis particulièrement flatté de la présence à ce jury de Monsieur J.L. DELCUVELLERIE, Docteur de l'INPL (Institut National Polytechnique de Lorraine), animateur de la commission technique "SAP" de l'EXERA et chef du service 'Conseil et Systèmes Avancés de Conduite' à la société EURIWARE.*

*Qu'il trouve ici le témoignage de toute ma reconnaissance pour l'honneur qu'il me fait en jugeant ce travail.*

*Je voudrais adresser une pensée toute particulière à tous les membres du LAIL de l'EC Lille auxquels je suis reconnaissant de leur bonne humeur et de leur aide précieuse tant sur le plan scientifique que sur le plan humain.*

*Je tiens, à ce sujet, à remercier tout particulièrement Messieurs E. CRAYE et E. CASTELAIN pour leur soutien moral et leur disponibilité. Ils ont su me faire profiter de leur expérience à travers nos nombreuses discussions. Enfin, je leur suis très reconnaissant de leurs remarques pertinentes et leurs précieux conseils ainsi que de leur agrément, en tant que première validation et reconnaissance, des idées avancées et développées dans ce mémoire.*

*Enfin, je remercie très sincèrement Monsieur M. VANGREVENINGE pour la reprogrammation de ce mémoire.*

## SOMMAIRE

	Pages
<b><u>INTRODUCTION GÉNÉRALE</u></b> .....	7
 <b><u>CHAPITRE I: CONTEXTE ET PROBLÉMATIQUE DE L'ÉTUDE</u></b>	
<b><u>Partie 1:</u></b> Définitions, caractéristiques et évolutions des systèmes de production .....	11
<b><u>Partie 2:</u></b> Le projet C.A.S.P.A.I.M. - Généralités .....	41
<b><u>Partie 3:</u></b> Spécification et conception préliminaire .....	55
 <b><u>CHAPITRE II: DÉMARCHE DE SPÉCIFICATION ET DE CONCEPTION D'UN SYSTÈME DE COMMANDE</u></b>	
<b><u>Partie 1:</u></b> Le projet C.A.S.P.A.I.M.1 - Limitations .....	65
<b><u>Partie 2:</u></b> Évolutions - Le projet C.A.S.P.A.I.M.2 .....	73
<b><u>Partie 3:</u></b> Spécification formelle et génération automatique des gammes opératoires .....	97
 <b><u>CHAPITRE III: MISE EN ŒUVRE DE LA DÉMARCHE</u></b>	
<b><u>Partie 1:</u></b> Description détaillée des fonctions opératives .....	121
<b><u>Partie 2:</u></b> Démarche complète - Application à un exemple .....	169
 <b><u>CONCLUSION GÉNÉRALE</u></b> .....	 197
 <b><u>BILBLIOGRAPHIE</u></b> .....	 205
 <b><u>TABLE DES MATIÈRES</u></b> .....	 219
 <b><u>LISTE DES FIGURES</u></b> .....	 225

# INTRODUCTION GÉNÉRALE

Dans le domaine des **systèmes de production discrets**, il n'existe, à l'heure actuelle, aucune **méthode ou méthodologie globale et universelle de conception**.

Pourtant dans ce domaine, la compétitivité ne fait aucune concession aux entreprises de fabrication notamment dans l'**industrie manufacturière**. En effet, ces **entreprises**, pour être de plus en plus compétitives, doivent s'**adapter** rapidement, en terme de **réactivité** et de **flexibilité**, à la fluctuation du marché actuel, caractérisé principalement par les **petites et moyennes séries**.

Ce manque de méthodes et d'outils performants s'explique par la difficulté d'appréhender ces systèmes de production, qui ne cessent d'évoluer d'un point de vue **gestion/contrôle** mais, aussi, sur le plan **matériel**.

Cette évolution donne lieu à des solutions globales qui sont généralement spécifiques à une application donnée ou, une classe d'applications, et donc, non universelles.

En effet, sur le plan gestion/con

trôle, la plupart des systèmes ne sont qu'une **addition de solutions technologiques** (calculateurs, organes de commande numérique, réseaux de communication ...) et **informatiques** (logiciels de gestion de données, de gestion de production, de pilotage ...).

Chacune de ces solutions est, en général, définie indépendamment des autres, sans souci de coopération ni de cohésion. Leur association, pour une application particulière, nécessite alors des interfaces de communication (échange de données) qui alourdissent, de fait, la gestion complète.

Il est, donc, difficile de définir une **architecture** ou une **organisation universelle de référence** des différentes fonctions d'un système de gestion/contrôle à partir de laquelle on pourrait effectivement définir des méthodes de développement couvrant une ou plusieurs fonctions particulières de cette architecture de référence.

La difficulté est double puisqu'il faut identifier, dans un premier temps, les fonctions de gestion/contrôle de base (invariants fonctionnels). Ensuite, il faut définir une **organisation intégrée** type (invariant organisationnel) de ces fonctions qui soit d'une optimalité satisfaisante.

De grands projets ou consortiums européens (ESPRIT) tels que CIM-OSA et IMPACS tentent de définir ce type d'architecture.

Sur le plan du matériel de production automatisée, le problème est similaire. Les moyens de production sont de plus en plus **flexibles et intégrés** (multifonctions) et donc plus complexes. Chacun de ces systèmes constitue une solution particulière non élémentaire ce qui rend la tâche d'optimisation très difficile lors de leur exploitation commune.

De même que pour l'aspect gestion/contrôle, certains projets européens (ESPRIT) tel que PRIAM tentent de définir des **invariants matériels** (actionneurs intelligents) et des **architectures distribuées** (solution élémentaire) par l'intermédiaire de **réseaux** de communication de **terrain** (niveau 0).

En résumé, l'**objectif à terme** est la définition de **méthodes intégrées** de conception tenant compte de ces nouvelles spécificités.

Ces méthodes de conception devront permettre la définition et la mise en place de **systèmes de production efficaces, à moindre coût et rapidement**. Les grandeurs caractéristiques pour mesurer cette efficacité sont la **productivité** du système conçu et la **qualité** du produit œuvré.

L'efficacité d'une méthode se mesure aussi par rapport à la qualité des **concepts** qu'elle met en œuvre pour **appréhender correctement et rapidement des systèmes complexes**. Ces concepts doivent être définis de manière à offrir un **haut niveau d'abstraction** et une **sémantique rigoureuse** pour appréhender des classes de systèmes assez divers et pour passer facilement, de manière plus ou moins systématique, du conceptuel au réalisationnel.

A ces concepts, il faut associer un ou plusieurs **formalismes**, de préférence de type graphique, pour représenter les résultats intermédiaires sous une forme très synthétique et facilement compréhensible.

Tel est l'**objectif du génie automatique et du génie productique** qui, à l'instar du génie logiciel, essayent de proposer des méthodes et des outils informatiques supports pour développer (formaliser, analyser et concevoir) et maintenir des systèmes de production automatisés de nature quelconque.

Le travail, présenté dans ce mémoire, s'inscrit pleinement dans ce cadre et porte, en particulier, sur la définition d'une **méthode de conception**, basée sur des **concepts orientés objet, du système de coordination**. Ce système de coordination fait partie intégrante du système de gestion/contrôle (partie logique). Pour cela, elle est basée sur une **approche de description adéquate de la partie procédé** (partie physique) ou, opérante, d'un système de production discret.

La démarche complète est principalement basée sur la notion de Composants Logiciels Réutilisables (CLR) issue du génie logiciel.

La démarche de **modélisation** (prototypage rapide) de la partie **procédé** (partie physique) repose sur une description **structuro-fonctionnelle** des différents moyens de production (machine, robot, convoyeur, ligne de transfert ...).

Cette description est faite à partir d'un ensemble de **primitives** (fonctions) **opératives pré-définies** de spécification et de modélisation. Chacune de ces fonctions opératives de base décrit un comportement élémentaire commun à un ensemble de ressources de production. Elles constituent ainsi des **invariants de fonctionnement** d'une partie procédée. Ces invariants sont relatifs à des **invariants matériels** de type "actionneur" du domaine considéré.

Nous obtenons, ensuite, une description complète d'une ressource par combinaison des fonctions opératives particulières la définissant et dont chacune aura été associée à un organe faisant partie de cette ressource.

La démarche de conception préliminaire du système de coordination est basée sur une **approche** orientée "**flux de produits**", c'est à dire, définie par des "**objectifs produit**". Cette approche correspond à une description détaillée du suivi de chaque type de produit. Elle fait, ainsi, apparaître la succession des **supports significatifs**, à une commande de coordination, sur lesquels un type de produit va subir une opération caractéristique (traitement ou mouvement) et relative à sa gamme de fabrication.

La mise en œuvre de cette approche consiste, dans un premier temps, à formaliser (spécification et modélisation) les **objectifs de production**. Ils concernent les différents **types de produit** à fabriquer et leur **ratio** de production respectif, par l'intermédiaire de gammes dites "**logiques**". Ces dernières ne font apparaître que les opérations de fabrication (usinage, conditionnement, mesure, assemblage ...).

Ensuite, ces gammes logiques sont développées (prototypage lent) en intégrant progressivement la partie physique pour générer de manière systématique des gammes dites "**opératoires**". Sur une gamme de ce type, les différentes ressources de production (fabrication, manipulation, transport et stockage) nécessaires à la fabrication du type de produits correspondant, sont mises en évidence.

Cette **génération systématique** des gammes opératoires, à partir des gammes logiques par intégration de la description de la partie physique, est basée sur les notions de **lieu caractéristique** et de **relation d'accessibilité**.

Un **lieu caractéristique** est relatif à la description d'une ressource de production et correspond à l'ensemble des **zones opératoires**, où seront réalisées les opérations figurant sur la gamme logique, et des **lieux ou zones de stockage** accessibles de l'extérieur et susceptibles de supporter un produit en provenance d'une autre ressource.

La relation d'accessibilité permet de mettre en évidence les différents lieux de stockage dits caractéristiques en exprimant un lien de transfert pour un produit donné entre deux ressources adjacentes au niveau d'une gamme. Elle est, donc, relative à l'aspect **transitique** dans le sens où elle exprime un **changement de lieu** pour un produit et définit, de ce fait, une **organisation** particulière des ressources de production.

Pour développer et présenter plus en détail les idées énoncées précédemment, nous avons décomposé ce mémoire de la manière suivante.

**-1- Dans le premier chapitre, nous commençons par une analyse des systèmes de production dans leur globalité pour mettre en évidence leurs caractéristiques essentielles et définir ainsi leurs propriétés clés, pour une gestion et une exploitation optimales à savoir : flexibilité, modularité, structuration, hiérarchisation et intégration.**

Dans une deuxième partie, nous présentons les généralités du projet **C.A.S.P.A.I.M.** (Conception Assistée des Systèmes de Production Automatisés en Industrie Manufacturière), développé au **L.A.I.L.** (Laboratoire d'Automatique et d'Informatique Industrielle de Lille). Nous présentons, ainsi, l'objectif en conception, le type de représentation retenue d'un système de gestion/contrôle et les principes généraux utilisés en conception.

Ensuite dans une dernière partie, après avoir défini le contexte de notre étude dans les deux premières parties, nous présentons la problématique de cette étude en définissant les grandes lignes de notre approche en spécification et en conception préliminaire.

**-2- Dans le deuxième chapitre, nous définissons (partie 2) les concepts utilisés pour mettre en œuvre notre approche de spécification et de conception préliminaire et qui ont permis de remédier aux lacunes d'une version précédente du projet CASPAIM présenté brièvement dans une première partie.**

Ensuite, nous décrivons de manière précise cette approche avec les concepts préalablement définis.

**-3- Dans le dernier chapitre, nous effectuons, dans une première partie, une description détaillée des différentes fonctions opératives permettant une description structuro-fonctionnelle de la partie procédé.**

Enfin pour terminer, l'approche complète est présentée, dans la dernière partie, à travers un exemple significatif d'application.

## CHAPITRE I

### CONTEXTE ET PROBLÉMATIQUE DE L'ÉTUDE

Partie 1 : DÉFINITION, CARACTÉRISTIQUES, ÉVOLUTION ET  
CONCEPTION DES SYSTÈMES DE PRODUCTION

**I- DÉFINITION, CARACTÉRISTIQUES ET ÉVOLUTION DES SYSTÈMES  
DE PRODUCTION**

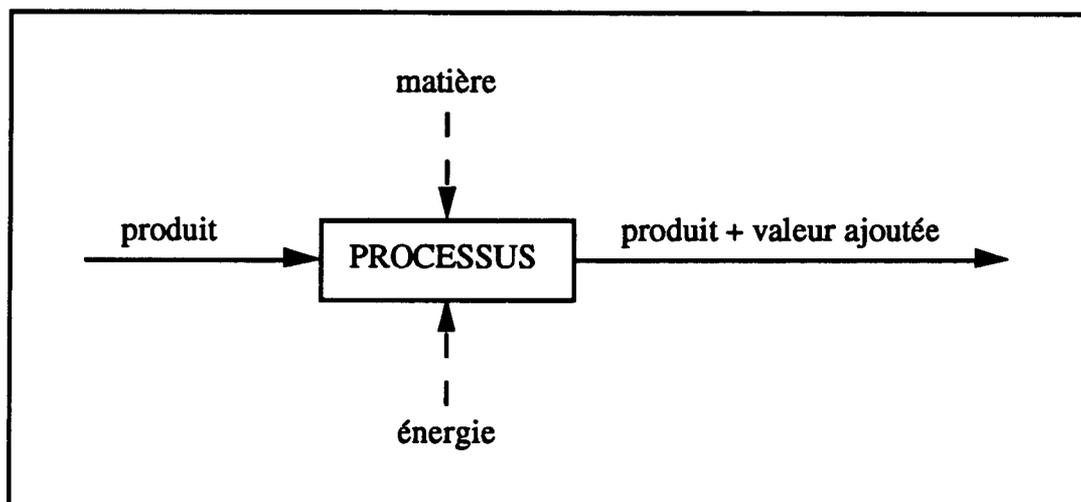
**I-1- Définition des systèmes de production “discrets”**

**I-1-1- Notion de processus**

La notion de “processus” est souvent utilisée pour définir la nature d'un système de production /FRO84/. Elle peut s'assimiler à une “boite noire” dans laquelle entre un produit brut quelconque qui subit un ensemble de traitements et qui en ressort nanti d'une certaine valeur ajoutée (figure I-1-1).

Un processus de fabrication crée donc une valeur ajoutée au produit entrant (matière d'œuvre) soit par un apport d'énergie (modification de propriétés physiques) et/ou soit par un apport de matière (assemblage).

La nature du processus, c'est à dire, l'ensemble des traitements à appliquer au produit ainsi que leur mise en œuvre technique (procédé), est intimement liée aux caractéristiques définissant celle du produit en question /RAK92/.



**Figure I-1-1 : Processus de production**

Il est qualifié de **processus continu** lorsque le produit est un flux continu de matière (chimie, pétrochimie, sidérurgie...) et on parle alors de “**Systèmes à États Continus**” (SEC).

Et lorsque le produit représente une matière solide et discrète, et qu'il constitue une

entité localisable individuellement, le processus est de type **discontinu**. Dans ce cas, on parle alors de “**Systèmes à Événements Discrets**” (SED) relatif au domaine manufacturier (mécanique, électronique...).

Selon la nature du processus de production, il est évident que les outils, techniques et méthodes de modélisation, de conception, de contrôle et de gestion diffèrent énormément.

Cependant, la réalité n'est pas aussi tranchée. Un processus peut être partiellement discontinu et partiellement continu (processus dis-continu) suivant le niveau d'observation qu'on en fait.

L'exemple illustratif, le plus souvent utilisé dans la littérature, concerne l'industrie agro-alimentaire /BAY92a/. La production de fromages ou de pots de yaourt comporte une partie continue qui se caractérise par la fabrication de la pâte laitière et de son transport de manière continue. Ensuite la mise en pot par unité élémentaire ainsi que les traitements suivants caractérisent la partie discontinue.

On parle alors de “**processus mixte**” et de “**systèmes hybrides**”. Dans ce cas, le choix du type des outils de contrôle et de gestion à utiliser est relativement facile, car la nature du processus est bien défini pour chacune des parties (**continue et discontinue**).

Néanmoins pour certains systèmes, la gestion de leur processus peut relever d'outils destinés au domaine **continu ou discontinu** en fonction du niveau d'abstraction et du point de vue que l'on en fait. Tel est le cas pour les systèmes de type “**Batch**” qui ont un caractère particulier en production /CHL91/.

Bien qu'ils s'inscrivent dans le cadre de processus de type continu, ils comportent néanmoins certaines spécificités relevant des processus de nature discontinue.

La matière n'est pas discrétisée en terme de produits dénombrables comme dans le manufacturier. Elle est plutôt quantifiée dans le sens où on effectue des traitements (mélange, malaxage ...) sur des produits de nature différente mais avec des quantités bien définies pour chacun des traitements.

L'unité de gestion n'est donc pas ici un produit physiquement individualisé (solide) mais une quantité d'un produit dont la nature est non palpable et intrinsèquement continue (fluide, gaz...).

De ce fait, une étude récente, portant sur l'application et l'adaptation, aux systèmes 'Batch', de certaines notions destinées à la conception et initialement prévues pour systèmes à événements discrets, a été effectuée /RAK93/. Ces notions sont issues d'outils, de méthodes et de concepts, de modélisation et de structuration, qui sont destinés au développement des systèmes à événements discrets.

D'après ces considérations, nous pouvons définir un **système de production discret** comme un système dont le processus de fabrication qui le caractérise est de type

discontinu.

Dans toute la suite de ce mémoire, le terme de “système de production” désignera, implicitement, les systèmes de production à caractère discret.

### I-1-2- Représentation d'un système de production

Un système de production quelconque peut se représenter, d'une manière générale, comme un système ou, un ensemble de sous-systèmes élémentaires, composé(s) principalement de deux parties complémentaires qui interagissent entre-elles (figure I-1-2) : la **partie commande** et la **partie procédé**.

Chaque système comporte également une partie “**interface**” permettant d'adapter, d'un point de vue énergétique, ces deux dernières /ANA87/.

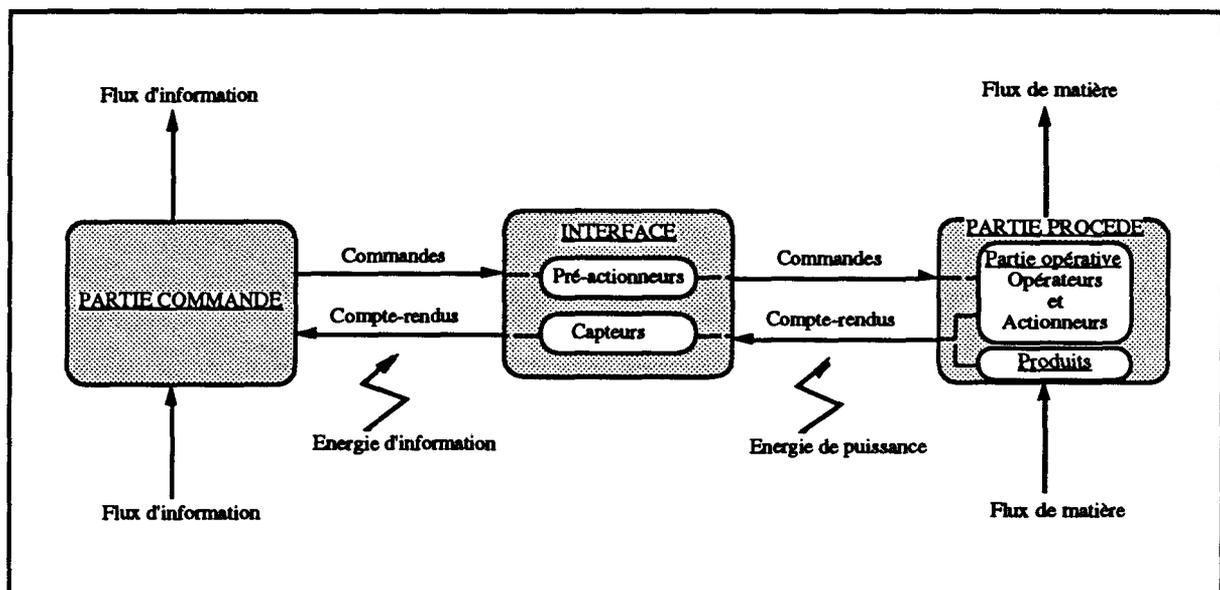


Figure I-1-2 : Système de production

(i) **La partie commande** a pour rôle d'assurer la coordination et le séquencement de commandes applicables à la partie procédé. Elle agit sur des **flux purement “informationnels”** et a un pouvoir de décision. Elle traite, transforme et transfère des informations avec comme objectif la prise de décisions.

Ces décisions sont élaborées en fonction d'informations de type “**compte-rendu**”, provenant du procédé, et de type “**consigne**”, provenant d'autres systèmes décisionnels, situés hiérarchiquement, soit à un même niveau, soit à un niveau différent.

De manière duale, les décisions prises par la partie commande sont émises soit vers d'autres systèmes de commande, sous forme d'information de type “**consigne**”, ou soit vers le procédé, sous forme d'informations de type “**commande**”.

Notons que, de ce point de vue, la notion de système de commande englobe aussi bien la conduite et la surveillance du processus physique que la gestion de production.

Une architecture fonctionnelle sera présentée par la suite (Par. II-2).

(ii) **La partie procédé** est constituée de l'ensemble des équipements et matériels intervenant dans le processus de production ainsi que leur organisation. Elle agit uniquement sur des flux de matières. Elle traite, transforme et transfère la matière d'œuvre (produits) afin d'en élaborer une valeur ajoutée.

Elle est composée :

- de la **partie opérative**,
- et de l'ensemble des **produits** sur lesquelles agit la partie opérative.

La partie opérative est elle-même constituée :

\* d'une part, du processus mécanique constitué de l'ensemble des **opérateurs** intervenant dans la chaîne d'action et mettant en œuvre le procédé technique. Ils sont, soit "**terminaux**" si ceux-ci se situent en bout de chaîne tels que les préhenseurs (pinces), les effecteurs (fraises, forêts ...) et autres moyens (hélices, réservoirs, pulvérisateurs...) ou, soit "**non-terminaux**" si ceux-ci interviennent indirectement tels que les dispositifs matériels permettant le maintien et le positionnement des pièces et outils,

\* et d'autre part, des différents **actionneurs** (moteurs, vérins, électrovannes, électroaimants, résistance de chauffage...) destinés à fournir de la puissance à ces opérateurs.

(iii) **La partie interface** peut être considérée comme un transformateur d'énergie permettant la communication ou l'interaction entre la partie commande, qui nécessite une énergie de type information et la partie procédé qui nécessite une énergie de type puissance. Elle est matérialisée par l'ensemble des **pré-actionneurs** (contacteurs, variateurs de vitesse, distributeurs pneumatiques et hydrauliques, électrovannes...) et l'ensemble des **capteurs** (position, vitesse...) rendant compte de l'état de la partie opérative et des produits.

## **I-2- Automatisation**

L'évolution du monde industriel et économique, ces vingt dernières années, a complètement bouleversé l'appareil de production dans sa globalité. Les structures de fabrication et de gestion se sont vues, très rapidement, inadaptées et trop rigides pour répondre, de manière satisfaisante, au besoin pressant de **productivité**.

Ce besoin, pleinement justifié par une concurrence grandissante et d'envergure mondiale, ne cesse d'imposer aux industries, pour être satisfait, des contraintes fortes en termes de **coûts**, de **délais**, et de **qualité** de production. Toute entreprise, pour être

compétitive, devait désormais fabriquer des produits de qualité à des cadences de plus en plus élevées et à faible coût.

En industrie manufacturière, et plus particulièrement celle de l'automobile, ce fait s'est vite concrétisé par la création de **lignes de transfert automatisées** très productives. Le phénomène "d'automatisation" était lancé puis les autres domaines de fabrication, tels que les industries de transformation par enlèvement de copeaux, furent touchés progressivement.

Le terme d'automatisation concernait essentiellement, à l'origine, les **grandes séries** et a longtemps été associé à celui de **productivité et de rigidité**. C'est ainsi que les premiers systèmes de production automatisés furent constitués de **machines dites "spéciales" à haut degré d'automatisation** et destinées pour un type de production donnée. Leur amortissement à très court terme, 30 à 60 % par an /VOI85/, garantissait largement leur utilisation pour une meilleure rentabilité.

Il est évident que toute modification du produit fabriqué, pour lequel ces machines ont été spécialement conçues, induisait des changements fastidieux et onéreux dus au manque de flexibilité. De plus, elles devenaient inutilisables lors de l'arrêt de la fabrication de ce produit.

### **I-3- Numérisation**

La demande en pièces mécaniques, concernant la petite et moyenne série, devenait de plus en plus pressante et parvint à toucher plus de 75% du marché. L'outil de production automatisé devait alors gagner en flexibilité pour s'adapter à une fabrication plus diversifiée /FRO84/

Seul le grand développement dans le domaine de la micro-électronique et notamment au niveau des microprocesseurs a permis, dans un premier temps, une automatisation poussée de la production en petite et moyenne série.

La diminution considérable des coûts des microprocesseurs a induit une plus grande polyvalence des **machines dites "universelles"** (tours, fraiseuses, perceuses, aléseuses...) en les dotant d'une **commande numérique**. Cette "numérisation" ou ce traitement numérique des informations, dans le domaine de l'usinage, a donné lieu aux **machines outils à commande numérique (MOCN)** et aux **centres d'usinage**.

L'évolution des autres sciences et l'apparition de nouvelles technologies, telles que la **robotique et l'informatique industrielle**, a permis la conception de systèmes de production de plus en plus flexibles /BON85/. Notons que la modernisation de l'instrumentation (capteurs) a contribué également à cette automatisation plus flexible de l'outil

de fabrication.

#### **I-4- La productique**

Le concept de productique, néologisme issu de l'évolution des systèmes de production, peut se définir comme une discipline générale intégrant toutes celles ayant attrait à l'automatisation de la production industrielle (techniques et matériels). Elle englobe des connaissances pluridisciplinaires telles que : l'automatique, l'informatique, l'électronique, l'électrotechnique, la mécanique, l'hydraulique...

Les pôles d'intérêt de la productique peuvent se regrouper ainsi :

-- **informatique industrielle** ou informatique appliquée à la conception (bureau des études) et à la fabrication (bureau des méthodes) d'un produit, à la gestion et la logistique industrielle, et au contrôle de processus temps réel,

-- **robotique industrielle** et matériels automatiques de fabrication.

Il n'existe pas de définition officielle de la productique bien que quelques unes aient été établies par certains auteurs telles que :

*“Ensemble des techniques et des moyens tendant à automatiser les activités de la production dans les phases de la vie d'un produit (définition, étude, fabrication, après-vente).”* M.Blanchard et P.Romant /FRO84/

*“Néologisme s'appliquant à tous les moyens dont la combinaison permet l'obtention de la productivité maximale, que ces moyens se situent au niveau des produits, des systèmes de gestion, des hommes et des outils de production”* P.Kessler /VOI85/

#### **I-5- Concept de flexibilité**

##### **I-5-1- Définition**

Le terme de **flexibilité**, synonyme d'**adaptabilité** et de **souplesse**, est de plus en plus employé en production discontinue.

La flexibilité d'un système, au sens large, peut se définir en termes de capacité et de rapidité d'adaptation à une nouvelle situation, prévue ou inattendue. Ces deux caractéristiques mesurent, d'une part, la vitesse et la précision (réponse du système) avec laquelle un système peut s'ajuster pour satisfaire une demande fluctuante sur le marché. Et d'autre part, elles traduisent l'étendue et la variété de la demande pouvant être prise en compte.

La tendance actuelle, au sein d'un système de production, est d'atteindre une flexibilité maximale. Il en résulte une explosion du concept de flexibilité sous toutes ses formes et à tous les niveaux de la production.

Qu'il s'agisse de la flexibilité au niveau de la partie matérielle ou de la partie logicielle d'un système, plusieurs auteurs ont tenté d'en donner une classification plus ou moins générale.

### **I-5-2- Classification des différents types de flexibilité**

Ces différentes classifications ont pour objectif de recenser et de définir les différents aspects que peut présenter le terme de flexibilité. Elles se distinguent essentiellement par la nature des critères, sur lesquels elles sont basées, et la nature des entités, sur lesquelles elles sont appliquées.

Une des premières classifications, basée principalement sur le facteur temps et proposée par /HUT79/, a mis en évidence quatre types différents de flexibilité : instantanée, à court terme, à moyen terme, à long terme.

Ensuite, huit classes de flexibilité furent recensées dans /BRO85/.

Cette dernière taxonomie semble assez intéressante de par son tour d'horizon relativement large sur le problème. Les différents types de flexibilité mis en évidence dans cette classification sont les suivants :

#### **-- Flexibilité des machines ("*machine flexibility*")**

Elle exprime la souplesse et la rapidité avec lesquelles les machines réagissent pour se reconfigurer (changement d'outillage, changement de programme pour une commande numérique) lors du passage d'un type de produit prédéterminé à un autre.

#### **-- Flexibilité de routage ("*routing flexibility*")**

De manière générale, elle met en évidence les différents trajets pouvant être empruntés par un produit pour son transfert d'un point à un autre.

Deux cas sont alors à considérer /SHI89/ :

\* elle est potentielle si les trajets des différents produits sont fixés au préalable pour un fonctionnement normal et redéfinis uniquement en cas de dysfonctionnement d'une machine. Le choix d'un itinéraire en mode de marche dégradé dépend de la localisation de la machine défaillante en question.

\* elle est active si le choix d'un trajet, pour un produit donné, s'effectue dynamiquement en fonction de l'état courant du système (charge instantanée, produits en cours de traitement, dysfonctionnement d'une machine...).

Notons que le routage flexible est de plus en plus exploité dans le cadre de travaux concernant l'ordonnancement dynamique ou ordonnancement temps réel.

**-- Flexibilité de production ("*production flexibility*")**

Elle mesure l'étendue de la gamme de produits, de types différents, pouvant être réalisés par le système.

**-- Flexibilité de produit ("*product flexibility*")**

Elle caractérise la possibilité d'un système à appréhender rapidement et économiquement un nouveau produit.

**-- Flexibilité d'ordre des opérations ("*operation flexibility*")**

Elle met en évidence la capacité d'un système à changer l'ordre des opérations constituant la gamme d'un produit donné.

**-- Flexibilité d'expansion ("*expansion flexibility*")**

Elle exprime l'aptitude d'un système à s'étendre d'une façon modulaire à partir d'une configuration matérielle et logicielle donnée.

**-- Flexibilité de mélange ("*mix flexibility*")**

Elle mesure l'étendue de la gamme de produits, de types différents, pouvant être traités simultanément par le système.

**-- Flexibilité de volume ("*volume flexibility*")**

Elle exprime l'aptitude d'un système à réagir pour faire face à des demandes fluctuantes en quantité, pour un type de produit donné.

## **I-6- Les systèmes flexibles de production - typologie**

Il n'existe pas de systèmes standards mais il y a autant de formes différentes que d'applications industrielles. Cependant, ces applications industrielles peuvent être caractérisées par une combinaison de systèmes universels de base qui sont classifiés par rapport au type de fonctionnement qu'ils assurent.

Trois catégories principales de systèmes flexibles de base sont généralement désignées pour caractériser une application particulière : les cellules flexibles, les lignes de transport flexibles et les ateliers flexibles.

La diversité des formes de ces systèmes flexibles étant donc importante, nous allons tenter de recenser les principales caractéristiques, de chacune de ces catégories, issues principalement des ouvrages /BON85/ et /FRO84/.

#### **-- Les cellules flexibles**

Elles sont caractérisées principalement de Machines-Outils à Commande Numérique (MOCN) avec changement automatique d'outils et de dispositifs automatiques pour la manutention et le transport.

En fait, ce concept de cellule est l'aboutissement naturel d'une évolution vers plus d'autonomie et d'intégration dans la fabrication. Cela se concrétise par une déconnexion de l'opérateur et de sa machine ainsi que la mise en place de stock-tampons amont et aval pour une plus grande autonomie de fonctionnement.

Pour ce type de système, il y a **non simultanée** dans la fabrication de produits, c'est à dire, qu'à un instant donné, un et un seul produit est traité au sein de la cellule.

La flexibilité de production se traduit, en général, par un traitement ou **une fabrication par lots**. Et ces lots sont constitués de produits de même type, étant donné le temps de reconfiguration non négligeable et nécessaire pour le passage d'un type de fabrication à un autre.

Parmi elles, on peut recenser :

\* les **cellules élémentaires constituées** d'une machine pluri-opérateur telle qu'un centre d'usinage, un tour horizontal ou vertical, et autres systèmes de traitement de pièces,

\* les **cellules à machines identiques** dont l'objectif est la fabrication de pièces très diverses par lancement de petites séries avec réduction de coûts et de délais de fabrication par rapport aux cellules élémentaires (machine unitaire).

\* les **cellules à machines différentes** destinées pour la fabrication de pièces dont la technologie nécessite plusieurs types de matériels.

## -- Les lignes de transfert flexibles

Ce type de système est le résultat d'une recherche vers plus de flexibilité des lignes d'assemblage. Leur fabrication est orientée, en majeure partie, vers la grande série et le concept de flexibilité de production a une signification un peu restreinte. Généralement, les produits fabriqués ont un ensemble de caractéristiques, de base, communes et possèdent de nombreuses variantes en phase de "finition". Tel est le cas en construction automobile où la reconfiguration des lignes robotisées est un problème crucial /YVA90/.

## -- Les ateliers flexibles

Ayant toujours comme objectif, une intégration poussée des fonctions de fabrication, les ateliers se situent tout naturellement dans le prolongement des cellules flexibles. Ils assurent la réalisation du **processus complet de différents types de produit simultanément** ce qui nécessite une infrastructure plus complexe et plus importante en taille et en nombre de machines.

Ils peuvent présenter des regroupements suivant un concept de cellules et utiliser un système de manutention et/ou de transport propre à chacune d'entre elles.

### I-7- Compromis productivité/flexibilité /BAR92/ /FRO84/ /BON85/

La recherche de flexibilité au sein d'une machine se fait au détriment de son rendement pour une production aux séries peu importantes. Les machines à commande numérique, capables d'effectuer une multitude d'opérations différentes, sont en général peu productives. Elles nécessitent un temps de préparation, pour les opérations de reconfiguration et de changement d'outillage, assez important ainsi que la présence d'un opérateur. De plus, le faible taux d'engagement de ces machines induit des en-cours et, de ce fait, des coûts de stockage ce qui rend difficile leur amortissement.

Les systèmes flexibles automatisés devraient répondre de manière assez performante à ce compromis dans les quelques années à venir (figure I-1-3).

Cela se concrétise, à la fois, par une **automatisation** et une **intégration** poussée des fonctions de production (transformer, manipuler, stocker, piloter...) par l'intermédiaire de moyens polyvalents automatisés et d'une gestion évoluée et centralisée de l'ensemble /VOI85/.

Actuellement, la recherche vers plus de flexibilité, tout en ayant un rendement satisfaisant, semble se focaliser sur l'équipement, ou l'outillage, constitué :

-- des supports de pièces tels que les palettes, les plateaux et les platines ayant un rôle d'interface et permettant d'adapter les produits aux moyens de fabrication,

-- et des outils de manipulation, tels que les préhenseurs (pincés, ventouses...), et des outils de procédé, tels que les effecteurs (fraises, forêts, pincés de soudage...).

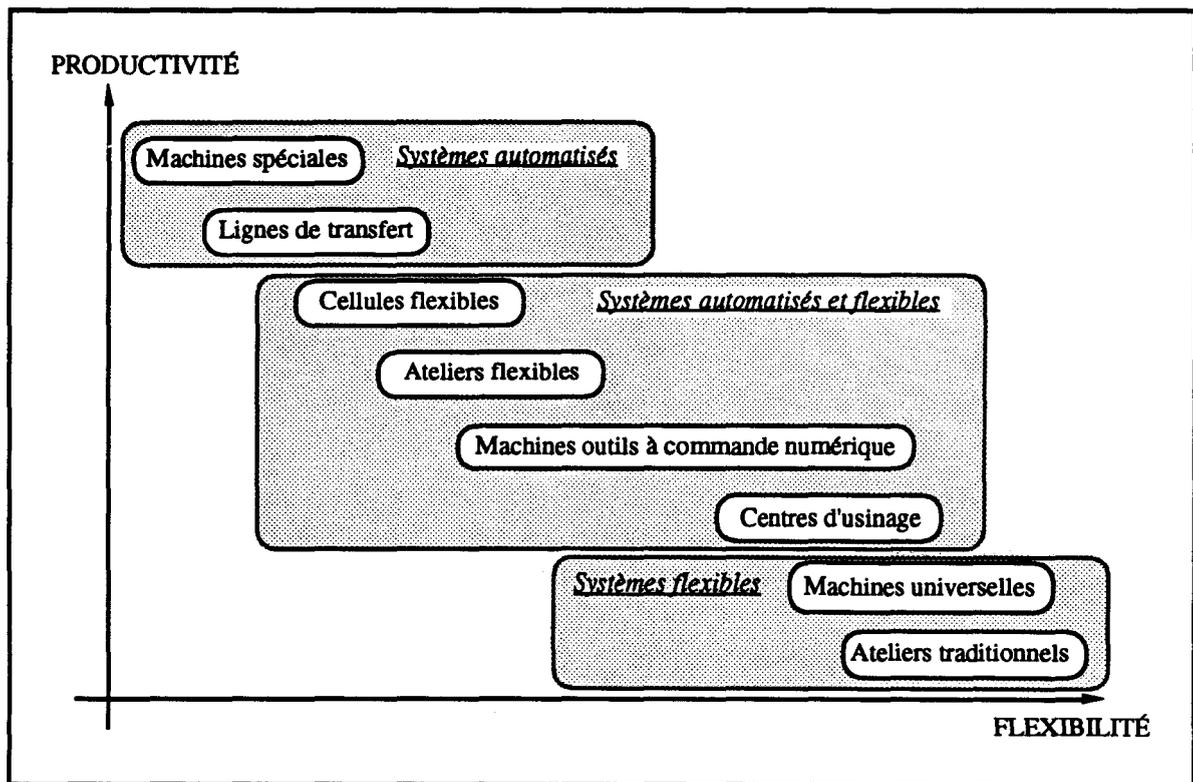


Figure I-1-3 : Compromis productivité/flexibilité

L'évolution de l'équipement devrait permettre une gestion plus efficace des temps de reconfiguration en automatisant et en intégrant les fonctions de stockage et de changement d'équipement.

Notons que la complexité de tels systèmes automatisés diminue la "fiabilité" de leur fonctionnement et demande un effort assez conséquent pour améliorer leur "maintenabilité" et leur "disponibilité".

## I-8- Intégration et gestion

### I-8-1- Modes d'intégration /MOR92/ /R&II91/ /CIM90/

#### I-8-1-1- Introduction

La complexité croissante des systèmes de production et la concurrence de plus en plus féroce, ces dernières années, ont entraîné la création de nombreux outils et techniques informatiques de pointe. Ils sont destinés à automatiser ou à assister le travail des différents intervenants dans chaque étape du cycle de vie des produits (spécification, conception,

fabrication et vente) à des fins d'optimisation.

Ces outils ou îlots d'automatisation facilitent et optimisent effectivement la tâche de ces intervenants en répondant à un besoin **spécifique et local** à certaines activités. Malheureusement, ils sont en général soit très redondants ou soit très hétérogènes donc difficile à faire communiquer. De ce fait, pour répondre à un objectif d'optimisation globale du cycle de production, le problème de la **cohérence globale des données** et donc de la **coopération de ces outils**, pour élaborer des décisions rapides et efficaces, devient très difficile et très complexe à gérer.

Le concept d'intégration est ainsi devenu le recours sine qua non à la gestion de cette complexité et donc à la maîtrise totale du volume d'informations manipulées. L'entité fédératrice de cette notion d'intégration est l'**information** en essayant de maîtriser au mieux le volume d'information (flux d'information) afin de permettre des prises de décisions rapides et intelligentes (flux décisionnels) à des fins d'optimisation globale du cycle de production (flux de matière).

Deux modes d'intégration sont alors possibles : une **intégration de type technique ou organisationnel** /HER90/ ou respectivement une **intégration "faible"** ou **"forte"** /VER91/ ou encore **intégration par les interfaces** (échange) ou **par les données** (partage) /MON90/.

Le premier mode est relatif à une **approche** que l'on pourrait qualifier de **"classique"** dans le sens où c'est la solution la plus employée, actuellement, dans le domaine de la productique car elle est immédiate bien qu'elle ne soit pas très efficace à long terme.

L'autre est relatif à une **approche** ayant comme objectif la recherche de la **solution idéale**. Elle est, de ce fait, beaucoup plus futuriste puisqu'elle nécessite des changements onéreux, en terme d'investissements à long terme, sur le plan organisationnel.

### **I-8-1-2- L'approche classique de la productique**

Elle consiste à intégrer certaines fonctionnalités d'une activité (conception, gestion, fabrication) au sein d'une même entité et ensuite à définir des standards d'échanges de données entre ces différentes entités. Ce mode d'intégration traduit la démarche classique de la productique et intervient directement **en phase d'exploitation** d'un système de production. Ce premier mode n'est pas la solution idéale mais a permis de répondre à très court terme aux exigences économiques des années 70-80.

En effet, face à une croissance sans cesse de la concurrence et à l'émergence des nouvelles techniques et technologies de pointe, les grandes entreprises et PME, prises dans un

effet de panique ou respectivement un effet de mode, étaient convaincues que le **tout technologique** était la solution absolue de survie et/ou de notoriété. Il fallait donc moderniser rapidement l'appareil de production en automatisant toutes les activités par des moyens informatiques. On a donc assisté à une explosion de solutions techniques et technologiques de production.

Malheureusement, cette ambition du tout technologique, à mauvais escient car appliqué à un modèle d'organisation inadéquat et notamment de type taylorien, c'est à dire, **hiérarchisé et fonctionnel**, a provoqué des incompatibilités en terme d'efficacité pour des raisons d'optimum global.

En effet, pour gérer la complexité d'une grande entreprise, on préconisait une décomposition des activités en fonctions et services afin de minimiser cette complexité et d'optimiser les performances d'un point de vue local. C'est ainsi que chaque activité s'est vu affectée ses propres techniques et outils informatiques d'assistance. Cela a renforcé le **cloisonnement** et la hiérarchisation des activités ainsi que la **centralisation des décisions**. Le résultat s'est vite soldé par une grande désillusion quant aux gains escomptés en terme d'objectif global de l'entreprise.

En quelque sorte, on reproche à la démarche classique de la productique de s'être uniquement intéressée, dans un premier temps, à l'**addition** de solutions technologiques sous forme d'îlots d'automatisation, logiciels ou matériels, dédiés de manière naturelle à certaines fonctions :

- soit de fabrication (MOCN, îlots robotisés, cellules flexibles ...),
- soit de conception et de gestion technique que l'on peut regrouper sous le sigle générique de XAO signifiant des techniques Assistées par Ordinateur (GPAO : Gestion de Production, CFAO : Conception et Fabrication, MAO : Maintenance, ...).

Cette forme d'intégration s'est donc effectuée sans souci a priori de cohésion et de synergie de l'ensemble de ces applications sous une certaine forme d'organisation.

D'où une perte d'efficacité assez considérable et principalement causée par la mise en place de systèmes d'information "boiteux" résultant de l'utilisation de multiples interfaces visant à adapter et à faire communiquer ces différents îlots.

Ce **problème de communication** provient, d'une part, de l'absence d'îlots d'automatisation normalisés et universels devant passer tout d'abord, en principe, par la définition et la reconnaissance d'une architecture et d'une organisation de référence.

Et par ailleurs, ce problème est relatif en l'absence de standards et de normes universels concernant l'échange d'informations entre ces différents îlots.

Ces problèmes concernent aussi bien le logiciel que le matériel.

Sur le plan logiciel, les sociétés d'ingénierie répondent à des besoins ponctuels par l'intermédiaire d'applications spécifiques. Chacune de ces applications utilise son propre gestionnaire de données avec un codage d'informations spécifique à des utilisateurs appartenant à un corps de métier particulier (automaticiens, informaticiens, mécaniciens, électriciens ...).

Cela engendre des saisies (automatiques et manuelles) multiples, des redondances, des retranscriptions et des manipulations excessives d'information qui altèrent l'efficacité globale.

Sur le plan matériel, l'hétérogénéité des équipements pose d'énormes problèmes d'interconnexion et d'interopérabilité, en terme d'ouverture vers l'extérieur (systèmes ouverts) et de normalisation.

En effet, chaque constructeur, par souci d'exclusivité sur le marché, tente d'imposer sa propre norme et une ouverture restreinte à son propre matériel (multi-langages). D'où un amalgame de solutions matérielles non génériques.

### **I-8-1-3- L'approche intégrée de la productique ou concept CIM - approche systémique**

L'autre solution d'intégration est l'approche préconisée par le **concept organisationnel CIM** (Computer Integrated Manufacturing) ou selon la traduction de l'ADEPA (Agence National pour le Développement de la Productique Appliquée à l'Industrie) celui de **productique intégrée**.

Beaucoup plus **futuriste**, elle ne prône aucunement les prouesses technologiques. Elle est plutôt basée sur la définition d'un modèle d'organisation idéal et conventionnel des différentes fonctions de gestion (technique, commerciale, finance ...) et opérationnelles (fabrication) de **l'entreprise de demain** pour une intégration totale.

Ce modèle met l'accent sur l'organisation, en prime abord, avec beaucoup de réflexion et de bon sens et ne fait intervenir une technologie poussée que là où elle est nécessaire.

Contrairement à l'approche classique, elle préconise une **démarche systémique** afin d'appréhender le fonctionnement de l'entreprise suivant une **vision globale** /MEL79/ /LEM90/. Elle intervient dès la **phase de conception** d'un système de production en essayant de définir d'abord une organisation type, suivant un référentiel neutre, par identification des différentes activités ainsi que les données pertinentes et échangées entre ces dernières (entrées et sorties).

Le but est bien sûr, de définir un système d'information efficace (maîtrise du flux

d'information) mais aussi, de définir des comportements de coopération (coordination, synchronisation) en établissant des liens entre les différentes activités de telle sorte qu'elles puissent cohabiter harmonieusement et entretenir des relations de partenariat.

L'établissement de ces liens va exprimer une organisation type suivant des séquencements ou des enchaînement logiques (comportement) au niveau des actions à entreprendre au sein des activités pour élaborer une décision efficace et intelligente.

La maîtrise des flux décisionnels vise à entreprendre des décisions non plus à des fins d'optimisation locale à une activité mais à des fin de **performance globale et totale** de l'entreprise (décloisonnement) en termes de : /GAL90/

- productivité et qualité totale,
- mais aussi et surtout de synchronisation totale.

L'enjeu essentiel de la compétitivité devient la **réactivité de l'entreprise** ce qui nécessite une logique d'approche "système" pour définir ainsi un mode d'organisation intégrée (figure I-1-4).

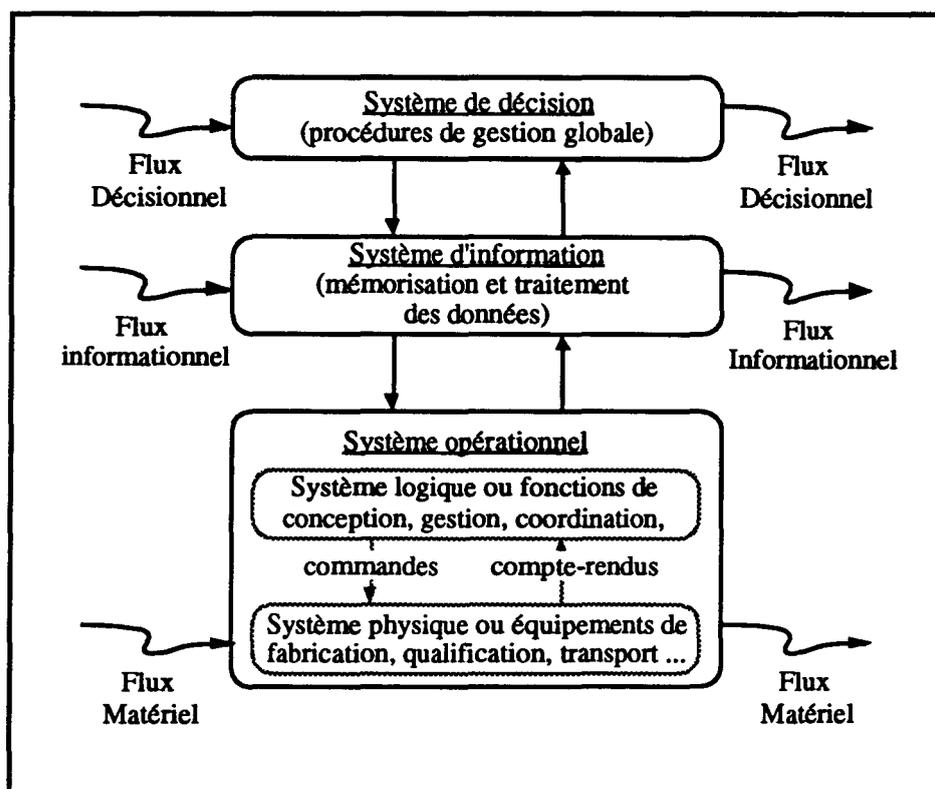


Figure I-1-4 : Représentation systémique d'une activité de production

Le but de cette approche systémique est de rendre plus "nerveux" les processus décisionnels et informationnels en :

- les raccourcissant, c'est à dire, en raccourcissant les lignes hiérarchiques,
- les rapprochant le plus possible du processus physique.

Ce n'est donc pas, un mode d'organisation fonctionnelle et hiérarchique, avec des prises de décision centralisées mais, plutôt un mode d'organisation structurée et distribuée (figure I-1-5).

Dans ce type d'organisation, les fonctions de l'entreprise ne sont plus hiérarchisées entre elles mais entretiennent des liens de coopération (communications horizontales) par l'intermédiaire de réseau de communication adéquat (contraintes temporelles). Et chacune de ces fonctions est hiérarchisée suivant différents niveaux décisionnels relatifs aux différents niveaux de gestion/contrôle (communications verticales) désormais classique : entreprise, usine, atelier, cellule, machine et équipement (capteurs, actionneurs).

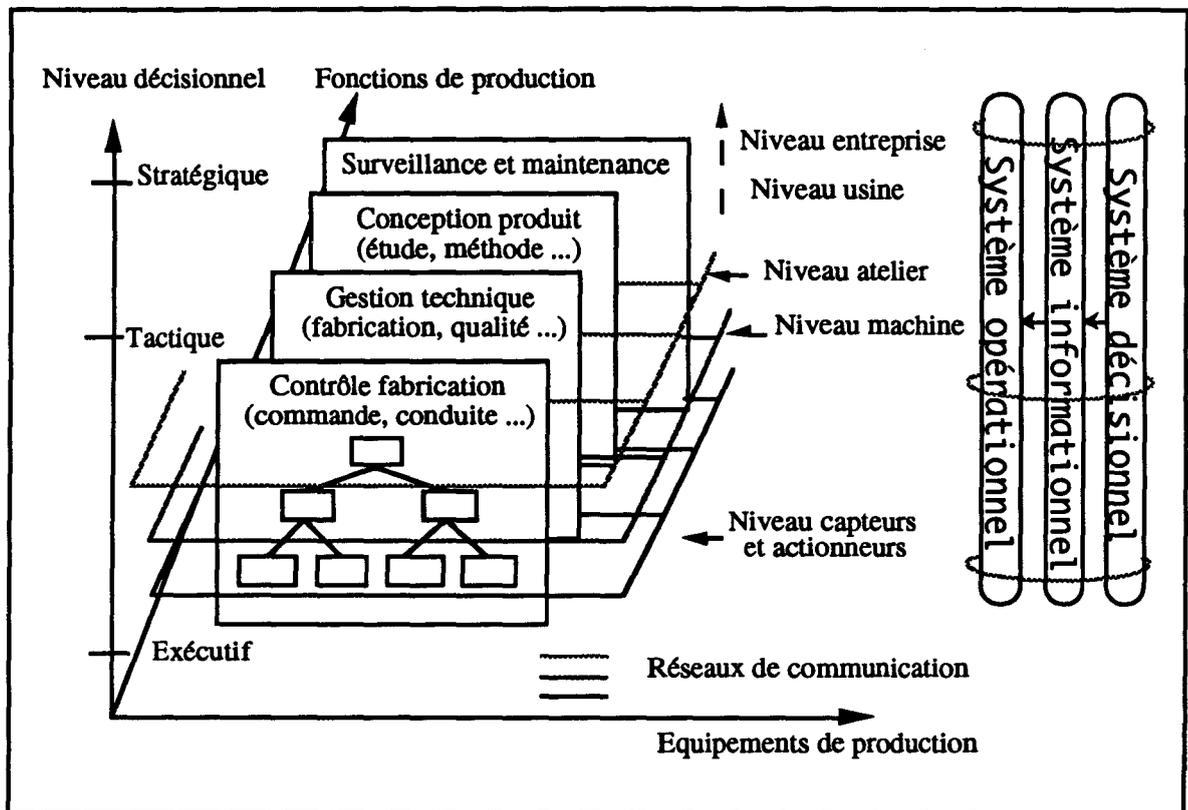


Figure I-1-5 : Organisation distribuée

Ce type de structuration a pour but de conférer plus d'autonomie aux différentes ressources intervenantes (matérielles et humaines) en leur donnant un certain pouvoir de décision d'où le concept d'**intelligence distribuée**.

Pour cela, il faut mettre directement à disposition les bonnes informations à chaque intervenant et au moment opportun. Et chaque information disponible pour chaque intervenant doit être accessible à tous les autres. D'où la nécessité d'un système d'information unifié (base de données partagées) pour des raisons de cohérence et de fiabilité informationnelle et, par corrélation, d'efficacité décisionnelle.

Actuellement, l'effort d'unification et d'homogénéisation du système d'information porte essentiellement sur les données techniques (activité de production) et devra à terme

intégrer d'autres types de données provenant des autres activités telles que : commerciale, stratégie, finance ..../BEN85/ /BEN86/ /ING88/

#### **I-8-1-4- Conclusion**

La productique a été et est encore considérée beaucoup plus comme une technique d'avant garde qu'une discipline à part entière. Le concept CIM ainsi que les termes (réactivité, flexibilité, autonomie ...) lié à ce paradigme correspondent à l'aboutissement et l'évolution naturelle de la recherche dans une discipline unique que représente la productique. Ce processus d'intégration qui met en avant un nouveau mode de pensée à travers un nouveau mode d'organisation et de gestion dit intégré doit s'effectuer progressivement.

Actuellement, nous pouvons considérer que la recherche menée dans ce domaine s'effectue suivant deux axes :

- développement d'îlots et d'outils automatisés destinés à l'exploitation des systèmes dans un contexte de production intégrée par les sociétés d'ingénierie et les fabricants de matériels d'automatisation,

- développement d'outils, de méthodes et méthodologies intégrés de conception d'un système de production suivant un cadre de modélisation bien défini et basé sur une architecture de référence.

Ce dernier axe de développement concerne principalement les travaux et les projets de recherche issus de laboratoires universitaires, d'organismes, d'activités de Recherche et Développement de certaines entreprises ou de consortiums établis pour mener une action conjointe entre ces différents groupes de travail.

#### **I-8-2- Îlots et Outils d'exploitation pour une production intégrée**

/MOR90a/

Parmi ces outils, nous avons :

- Les centres ou îlots de fabrication dits "intelligents et ouverts" au sein desquels les activités de maintenance (préventives), de contrôle-qualité en ligne et de conception des produits sont assurées. D'autre part, un nombre de plus en plus croissant de procédés différents d'usinage (fraisage, tournage, perçage ...) y sont intégrés.

- Les réseaux locaux /LEP89/, support physique d'une communication, permettent une intégration des données à tous les niveaux (terrain, atelier et entreprise) en essayant de respecter le modèle en couche de la norme OSI pour des raisons de connexion et d'ouverture

vers l'extérieur.

Chaque type de réseau, d'entreprise (ETHERNET), d'atelier (MAP : Manufacturing Automation Protocol et TOP : Technical Office Protocol) ou de terrain (FIP : Flux d'Information en provenance et vers le Processus), a des caractéristiques particulières. Celles-ci sont relatives aux contraintes de temps d'échange et aux volumes d'informations véhiculés.

Sachant que les contraintes de temps sont de plus en plus importantes vers les niveaux bas et les volumes d'informations de plus en plus croissants vers les niveaux hauts de l'entreprise, certaines couches du modèle OSI sont privilégiées et adaptées aux spécificités du réseau en question.

Certaines passerelles permettent l'interconnexion entre ces différents types de réseau.

L'effort le plus conséquent, en terme de normalisation et d'intégration, se situe au niveau des réseaux locaux industriels autorisant, aujourd'hui, la communication entre équipements de fabrication totalement hétérogènes. Les réseaux industriels MAP et TOP unifiés (MAP/TOP version 3.0) devraient apporter une solution satisfaisante dans ce domaine.

- L'architecture DNC (Direct Numerical Control) a permis d'étendre le protocole DNC1, vecteur de communication des données de fabrication et de gestion technique des équipements ou îlots vers une base de données industrielles, au protocole DNC2, vecteur de communication des informations de type contrôle-commande.

- Les systèmes d'informations et les bases de données industrielles n'ont, quand à eux, pas encore apportés de solutions véritables en terme d'intégration.

Actuellement, l'intégration d'un système de fabrication dans un système d'information se traduit par une multitude de réseaux locaux et de systèmes de gestion de bases de données reliés entre-eux.

### **I-8-3- Outils, méthodes et méthodologies de conception intégrée**

#### **I-8-3-1- Définitions et principes de modélisation**

Une méthode est basée sur un ensemble de modèles, langages et outils informatiques mettant en œuvre une démarche de conception, c'est à dire un ensemble de procédures ou règles à appliquer suivant un ordre bien défini /ALA88a/. Une méthodologie, dans notre contexte, est interprétée comme l'étude et la mise en œuvre d'un ensemble de méthodes utilisées conjointement.

Une méthodologie intégrée ou CIM nécessite l'utilisation /DOU90/ :

- d'un cadre de modélisation ou d'une architecture de référence,
- de formalismes de modélisation et des outils graphiques associés,
- et enfin de concepts ou primitives de base mettant en œuvre une approche méthodique de modélisation suivant une démarche structurée et hiérarchique.

D'après /DOU90/, une architecture CIM comprend un ensemble de modèles qui représentent les différents aspects d'un système CIM. L'architecture peut être vue comme une base pour la conception et l'implantation des systèmes CIM.

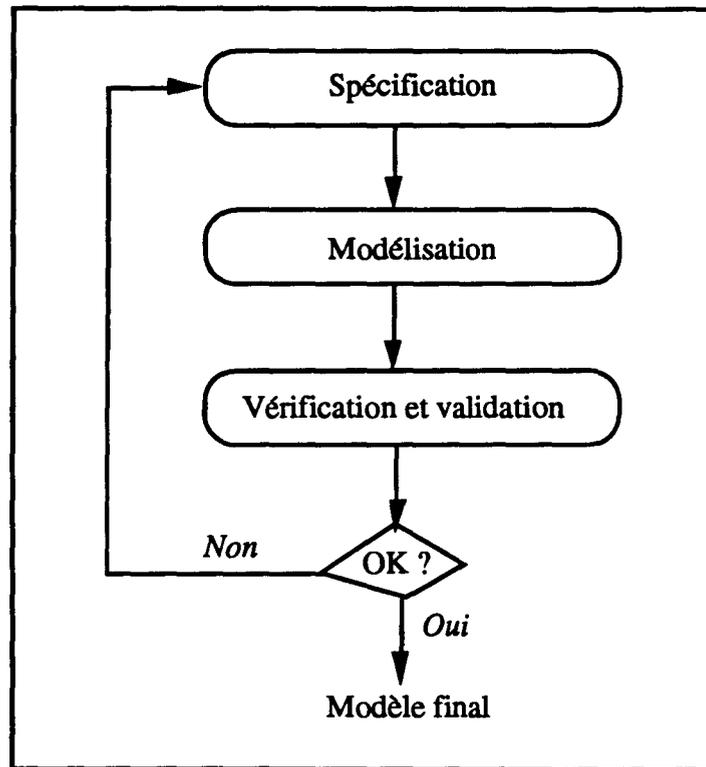
Ces modèles, contenant les éléments et relations entre ceux-ci, décrivent respectivement le "quoi", le "comment" et montrent la démarche de transformation des modèles en système réel.

Une architecture de référence est une architecture générique qui représente une classe de systèmes de production. Elle peut être utilisée comme modèle de référence pour générer l'architecture particulière du système étudié.

L'activité de modélisation est fondamentale en phase de conception car elle permet de formaliser le résultat d'une activité de conception (cycle de vie).

Le processus de conception (démarche) est alors considéré comme la transformation ou le développement d'un modèle de base (formalisation des besoins) jusqu'à un modèle final (modèle d'exécution ou de réalisation physique) suivant une démarche descendante et/ou ascendante de manière combinée. Et chaque étape de conception est caractérisée par un processus itératif de type "essai-erreur" (figure I-1-6) comportant une étape de spécification, une étape de modélisation et une étape de validation et de vérification.

L'étape de vérification permet de tester que le modèle a été correctement construit. Quant à l'étape de validation, elle permet de tester que le modèle construit correspond bien à la caractérisation des besoins initiaux et d'évaluer l'efficacité de la solution exprimée par ce modèle.



**Figure I-1-6 :** Processus de conception

Une méthodologie CIM est une méthodologie globale qui doit représenter complètement un système suivant les trois axes de modélisation (figure I-1-7) relatifs respectivement à trois principes de base :

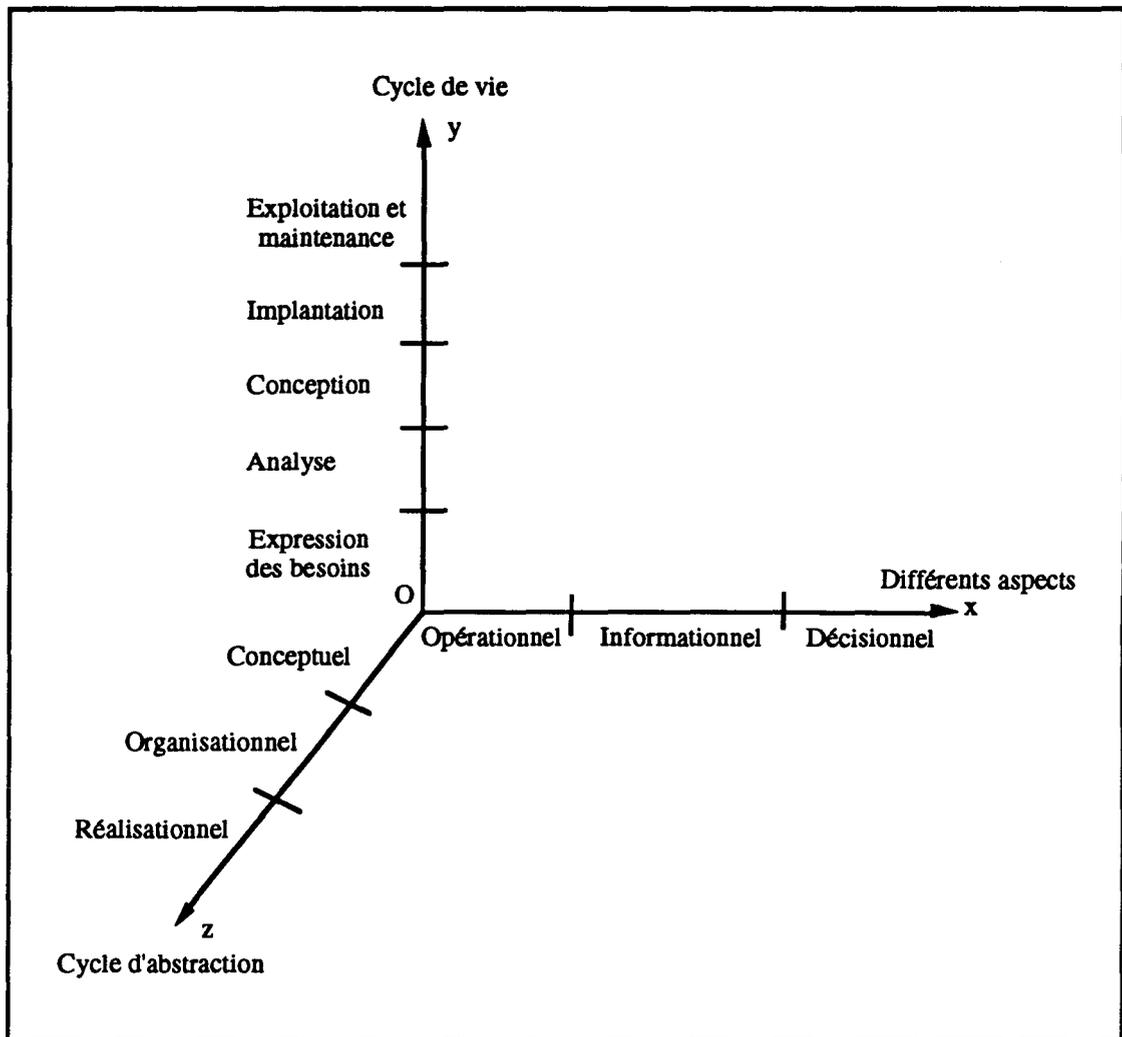
- l'instanciation (axe Oz) correspondant au cycle d'abstraction (généricité),
- la dérivation (axe Oy) correspondant au cycle de vie, c'est à dire aux différentes étapes caractérisant la vie d'un système depuis l'expression des besoins, justifiant sa "naissance", jusqu'à son exploitation et sa maintenance en bonne "vie" et en passant bien sûr par son développement ou sa création en phase de conception (complétude),
- la génération (axe Ox) correspondant aux différents aspects d'un système (couverture).

La notion de cycle de vie, formalisée en premier lieu dans le domaine de l'informatique et plus particulièrement celui du génie logiciel, a été normalisée par l'AFCIQ (Association Française pour le Contrôle Industriel et la Qualité). Un modèle très détaillé a été développé /VER91/ pour le domaine du génie automatique et du génie productique.

Un bon modèle doit représenter de manière amplifiée les caractéristiques importantes et de manière concise celles considérées comme peu importantes mais jugées nécessaires.

La pertinence ou non des caractéristiques d'un système à représenter dépend bien sûr de l'étape de développement considérée en conception (cycle de vie), de l'aspect ou point

de vue du système qui doit être représenté (domaine d'application) et du niveau de conceptualisation (cycle d'abstraction).



**Figure I-1-7 : Les différents axes de modélisation**

D'où l'importance d'un formalisme de modélisation adéquat et adapté au domaine d'application, c'est à dire possédant un certain pouvoir d'expression relatif aux caractéristiques essentielles à représenter.

Notons que le cycle d'abstraction est fortement lié à l'étape considéré du cycle de vie d'un système /LES91/. Ainsi un modèle d'expression des besoins sera plutôt un modèle à haut niveau d'abstraction (conceptuel) et un modèle d'implantation sera plutôt un modèle de bas niveau sémantique (réalisationnel).

Pour respecter au mieux les propriétés de généralité, de couverture et de complétude en modélisation, une méthodologie globale doit donc intégrer différents formalismes et proposer des concepts de haut niveau d'abstraction avec une sémantique puissante et précise.

Parmi les méthodes et méthodologies de conception contribuant d'une manière plus ou moins directe à une approche CIM, nous distinguons :

-- Les méthodes d'analyse et de conception issues du Génie Logiciel dont les principes sont de plus en plus employés en génie automatique et en génie productique. Elles ne couvrent en général que l'étape d'analyse et de conception du cycle de vie d'un produit logiciel tandis que les étapes de spécification et d'implantation (génération de code) sont peu ou non traitées.

-- Les méthodologies de conception des systèmes de production dans le domaine de la recherche. Leur ambition est d'essayer de traiter de manière quasi-complète, depuis la spécification jusqu'à la réalisation, un aspect particulier (informationnel, décisionnel ou opérationnel) en combinant de manière cohérente différentes méthodes et différents formalismes.

-- Les projets CIM visant à définir des modèles/architectures de référence pour la conception d'un système global.

-- Les méthodologies globales de conception d'un système CIM.

### **I-8-3-2- Méthodes et outils d'analyse et de conception**

Parmi les différentes méthodes développées, nous ne citerons que les plus connues telles que SADT, SDRTS, MERISE et les méthodes OOA et OOD.

-1- SADT (Structured Analysis & Design Technique) est une méthode développée par SOFTECH /ROS77/, plus adaptée pour analyser et comprendre les systèmes complexes de manière structurée que pour les concevoir à proprement dit.

Elle utilise un formalisme de type "Actigramme" pour représenter l'enchaînement des activités et "Datagramme" pour représenter la transformation des données. Elle est supportée par l'outil SPECIF\_X commercialisé par la société IGL /IGL89/.

-2- SDRTS (Structured Development for Real Time Systems) est une méthode d'analyse et de conception des systèmes temps réels développée par Ward et Mellor /WAR85/.

Elle est basée sur la méthode d'analyse SA (Structured Analysis) et les Diagrammes de Flot de Données (DFD) introduits par /DEM79/ auxquels est ajouté un diagramme complémentaire pour exprimer le contrôle de l'évolution du DFD appelé Diagramme de Flot de Contrôle (DFC).

Elle utilise, ensuite, la méthode de conception SD (Structured Design) et les diagrammes structurés introduits par Yourdon et Constantine et étendus par Meyers /JEN79/ pour décrire l'organisation du système de manière hiérarchique.

-3- MERISE est une méthode d'analyse et de conception des systèmes d'information développée par /TAR83/.

Elle consiste à élaborer des modèles de données (statiques) et des modèles de traitement de données (dynamiques) suivant les trois niveaux d'abstraction (conceptuel, organisationnel/logique et physique).

Elle utilise un formalisme de type Entité/Relation pour modéliser les données et un autre formalisme basé sur le principe des réseaux de Petri pour modéliser les traitements ainsi que leur synchronisation.

-4- Les méthodes OOA (Object Oriented Analysis) /COA91/ et OOD (Object Oriented Design) dont les principes furent développés à l'origine par /BOO91/ concernent le développement de logiciels de qualité.

Elles utilisent la notion d'objet ainsi que les concepts qui en découlent tels que l'encapsulation, la généricité et la réutilisabilité.

### **I-8-3-3- Modèles/architectures CIM de référence**

Les premiers modèles CIM furent développés dans les années 70-80 dont les principaux sont : ICAM, CAM.I et NIST. /DOU90/

-1- ICAM (Integrated Computer Aided Manufacturing) est un des plus importants projets CIM développé aux États Unis.

L'objectif était l'utilisation des techniques informatiques les plus avancées de l'époque dans le domaine de la production et dont le résultat fut l'élaboration d'un modèle de production pour l'industrie aérospatiale. Ce modèle consiste à construire une hiérarchie des activités réalisées par le système avec une finesse de détail identique à chaque niveau.

Chaque activité d'un niveau donné est explicitée par un ensemble d'activités d'un niveau inférieur.

Pour mettre en œuvre ce modèle, les outils IDEF (Icam DEFinition) ont été développés :

IDEF0 : pour le modèle fonctionnel,

IDEF1 : pour le modèle informationnel,

IDEF2 : pour le modèle dynamique de simulation.

-2- CAM.I (Computer Aided Manufacturing - International) est une organisation à buts non lucratifs réunissant plus de 100 grandes sociétés au niveau mondial.

L'objectif de cette organisation est de promouvoir la coopération des entreprises dans le domaine de la recherche et du développement de systèmes intégrés de production.

Le modèle CAM.I a défini quatre niveaux de décomposition d'une entreprise dont deux uniquement (niveau atelier et cellule) ont été détaillés suivant un formalisme issu de la méthode SSAD (Structured System Analysis & Design) /GAN77/.

-3- NIST (National Institute of Standards and Technology) est un organisme gouvernemental aux États-Unis.

Il a développé un modèle standard et hiérarchique décomposé en cinq niveaux pour représenter un système de production : usine, atelier, cellule, station de travail et machine. Aujourd'hui, ce modèle est largement utilisé comme référence de base.

#### **I-8-3-4- Méthodologies de conception**

##### **-a- Système d'information**

Concernant le système d'information, un des axes les plus significatifs, dans le contexte CIM, concerne le projet PTA (Poste de Travail pour l'Automaticien) /MOR87/ issu des travaux de /FRA87/.

Ce projet, regroupant un ensemble d'entreprises, d'organismes et de laboratoires français, a défini un modèle conceptuel de données BASEPTA (Base Application et Standard d'Échange du Poste de Travail de l'Automaticien) /PTA89/ pour représenter une application d'automatisation et un standard d'échange entre différents postes de CAO dans un contexte de génie automatique.

##### **-b- Système décisionnel**

Dans le cadre des systèmes décisionnels, /MOR92/ & /BAR92/ ont mis en évidence les deux principales sources de difficultés pour l'établissement d'un modèle conceptuel dans ce domaine.

La première concerne le cadre de traitement des différents outils ou gestionnaires mettant en œuvre une méthode de gestion de production, telle que MRP (Manufacturing Resource Planning), OPT (Optimized Production Technology) et JIT (Just In Time).

Ils sont couramment restreints soit aux fonctions de planification et au suivi du flux de production, soit à l'ordonnancement et de façon générale à l'analyse de flux entre machines.

Et la seconde concerne l'absence de définition précise d'un modèle de base sur lequel s'appuient ces différentes méthodes de gestion.

Cela implique une intégration difficile du temps réel au sein de la gestion de production pour définir un modèle global.

Et cela explique le découplage actuel dans le contexte CIM (Par. I-8-3-5) entre les différents niveaux (horizons/périodes temporels) de décision.

On trouve les fonctions à haut niveau de stratégie (long et moyen terme) concernant la gestion globale (Plan Stratégique Industriel, Programme Directeur de Production, Planification des besoins).

Puis, il y a les fonctions moins stratégiques dites tactiques, c'est à dire de plus bas

niveau et relatives au court terme (pilotage, commande, contrôle, maintenance).

Les méthodes d'ordonnancement à court terme (temps réel) issues de la recherche /HAM91/ /CAR88/ /ROU88/ devraient combler le fossé et servir de passerelle.

Actuellement, seule la méthodologie GRAI, qui a été développée par le laboratoire GRAI de Bordeaux /DOU84/ pour l'analyse et la conception des systèmes de gestion de production, semble la plus adaptée à la conception des systèmes de décision.

Elle permet de représenter un système de décision en identifiant les différents centres de décision à travers un tableau appelé la grille GRAI. Ensuite elle utilise les réseaux GRAI pour représenter les activités de décision mises en évidence dans la grille GRAI au niveau de chaque centre de décision.

Un travail complémentaire à la méthodologie GRAI a été développé au laboratoire LIA de l'Université de Savoie /AYE90/.

Il concerne la supervision (coopération et coordination) des activités de gestion de production à l'aide de techniques d'Intelligence Artificielle (IA).

Une architecture hiérarchique est proposée dans laquelle la tâche de supervision est distribuée au niveau d'îlots d'activités prémunis d'une certaine intelligence (IA distribuée) par l'intermédiaire de graphes dits "stratégiques".

Ces graphes ont pour but de décrire dynamiquement l'enchaînement d'activités de gestion (modules dédiés) pour élaborer une décision stratégique suivant un objectif particulier (lissage des charges par exemple).

### **-c- Système opérationnel**

Le troisième axe de recherche concerne le système opérationnel et le système décisionnel de bas niveau (fonctions tactiques et exécutives).

La recherche semble beaucoup plus abondante dans ce domaine puisque plusieurs travaux issus de différents laboratoires sont connus à ce jour. Ces différents travaux ayant comme thème général la conception des systèmes de production sont souvent articulés autour d'une préoccupation principale.

Elle porte sur le développement de méthodes et d'outils informatiques pour assister ou systématiser la conception de système de contrôle-commande des systèmes de production flexibles dans le domaine manufacturier.

Le formalisme Réseau de Petri (RdP) /BRA83/, ainsi que les outils de haut niveau qui en dérivent tels que les RdP stochastiques, les RdP colorés, les RdP objets, ... dominent largement l'activité de modélisation.

Il s'avère ainsi comme l'un des outils les plus adaptés et privilégiés pour représenter les principales caractéristiques dans ce domaine.

D'autres outils comme le grafcet, les systèmes à base de règles, les langages synchrones, les réseaux à file d'attente, etc ..., trouvent une place plus ou moins importante en modélisation et qui, dans certains cas, cohabitent avec les RdP.

Parmi ces travaux, nous pouvons citer les différents laboratoires suivant :

- le LAAS à Toulouse /VAL88/ /BAK90/ /BAS92/ /PAL91/ /SAH87/,
- le LAG à Grenoble /MER88/ /LON92/ /DEV92/,
- le LACN à Nancy /PAN91a/ /MOR92/,
- le LAB à Besançon /BOU84/ /BOU90a/ BOU90b/ BOU90c/,
- le laboratoire de Génie Automatique de l'ISMCM à Saint-Ouen /ANA87/,
- le LAMM de Montpellier /PRU87a/ /PRU87b/,
- le laboratoire LURPA de Cachan /KIE90/,
- le LASSY à Nice /AND91/,

et sur le plan international :

- le département d'Ingénierie Électrique et Informatique de l'université de Saragosse /MAR88/ /VIL88/.

Le projet CASPAIM, qui fera l'objet de notre étude dans ce mémoire et qui est développé actuellement au Laboratoire d'Automatique et d'Informatique Industrielle de Lille (LAIL), s'inscrit également dans ce cadre de recherche.

### **I-8-3-5- Méthodologies globales de conception**

En résumé, nous pouvons donc dire qu'il existe deux tendances d'intégration dans un contexte CIM (Par. I-8-3-4).

L'une est considérée comme une approche par les fonctions de gestion globale, élaborant des décisions plutôt stratégiques et tactiques (planification, ordonnancement ...) sur un horizon assez grand. Cette approche est donc descendante, c'est à dire du plus stratégique au plus exécutive (CIM généralisé).

L'autre, considérée comme une approche ascendante, est une approche systémique et orientée vers les fonctions plutôt exécutives (CIM réduit), concernant la gestion temps réel, et donc plus proche des équipements (niveau 0 et 1).

A travers cette dernière émanent certains concepts de base tels que le concept de filtre de comportement basé sur la modélisation de la partie opérative /LHO85/ /ALA86/, le concept de Capteurs et Actionneurs Intelligents (CAI) /CIA87/ /CIA88/ /ROB92/ /ANA87/ et le concept CMMS (Control Maintenance and technical Management System) associé au projet ESPRIT II DIAS (Distributed Intelligent Actuators and Sensors) /IUN92/ poursuivi actuellement dans le cadre du projet ESPRIT III PRIAM (Prenormative Requirements for Intelligent Actuation and Measurement) /LHO93/ /MOR92/.

De manière plus générale, cette dernière approche est synonyme de **distribution** d'une certaine **intelligence** au sein des **équipements** de bas niveau.

#### **-a- Approche par la gestion globale (CIM généralisé)**

Concernant la première approche, les principaux travaux ont été effectués dans le cadre des projets ESPRIT (consortiums réunissant des partenaires industriels et universitaires sur le plan européen sous l'égide de la Commission de la Communauté Européenne) tels que CIM-OSA et IMPACS /DOU90/.

CIM-OSA (CIM - Open System Architecture) est l'un des plus importants projets ESPRIT dans le domaine de la conception des systèmes CIM.

L'objectif, à terme, est de définir une approche globale pour la conception et l'implantation d'un système CIM.

Les principaux résultats portent sur la définition d'une architecture comprenant un cadre de modélisation (cube CIM-OSA), permettant de construire tous les modèles, et une infrastructure intégrante servant de support informatique pour interconnecter la totalité des composants logiciels d'un système CIM.

IMPACS (Integrated Manufacturing Planning And Control System) est probablement la première tentative dans le développement d'outils de planification intégrée.

Ce projet tente d'établir le lien entre la planification globale (à très long terme) et le contrôle en temps réel de la production.

Une architecture de référence, un cadre de modélisation et une méthode IMPACS ont été proposés.

#### **-b- Approche par la gestion temps réel (CIM réduit)**

La seconde tendance s'inscrit dans un contexte de **modélisation intégrée de connaissances multiples** (commande, maintenance, contrôle, gestion) relatif au point de vue DIAS-CMMS.

Ces travaux visent à distribuer une partie de l'intelligence au sein des équipements (niveau 0 : actionneurs et capteurs) afin de leur attribuer un certain pouvoir de décision et de les rendre autonomes (auto-contrôle).

Outre l'aspect contrôle-commande que revêt la notion d'actionneur et capteur intelligent, elle a pour but d'améliorer le problème de maintenance corrective (auto-diagnostic) en facilitant la tâche de détection et de diagnostic. Et de manière plus générale, elle doit contribuer à la sécurité d'installations et à la maintenance préventive.

Dans le domaine des systèmes continus, nous pouvons faire référence au groupe

de travail "Actionneurs Intelligents" dans le cadre CIAME (Comité Interprofessionnel pour l'Automatisation et la Mesure) regroupant des utilisateurs, universitaires et constructeurs d'actionneurs.

Notons que ce groupe de travail est animé par le Professeur STAROSWIECKI, directeur de l'équipe "Surveillance des Processus Industriels Complexes" du LAIL, dont les travaux dans le cadre CAI ont fait l'objet de multiples publications /BAY92b/ /BAY93/ /STA93/.

Ce groupe de travail a pour objectif le développement de l'architecture fonctionnelle de l'Actionneur Intelligent.

Dans le contexte des systèmes discrets, nous pouvons citer les travaux effectués au LACN de Nancy /ALA86/ /TUN91/ basés sur le concept CMMS et, en particulier, sur la notion de "filtre de commande". De même, l'équipe SED du LAIL a mis en œuvre ces principes pour le projet CASPAIM /AMA90/ /CRU91/ /ELK92/ /TOG92/.

Ces travaux concernent en partie la modélisation de la partie opérative dans un contexte de commande/surveillance. Ils visent à définir un modèle de détection et de surveillance locale par l'intermédiaire des langages synchrones pour intégrer la composante réactive à partir de laquelle un pronostic (arbre des causes) et un diagnostic (arbre de défaillance) sont effectués.

D'autres travaux s'inscrivent dans la même lignée et confortent le point de vue DIAS-CMMS, en définissant une **architecture physique décentralisée et distribuée** pour chaque équipement de production.

Prenons l'exemple du LAIM de Marseille /BER90/ qui propose une architecture dématérialisée des machines de production.

Cette dématérialisation est effectuée dans une optique de décentralisation des fonctions de contrôle/gestion par l'intermédiaire d'un système de communication unifié avec la notion de bus de terrain de type FIP pour les communications de plus bas niveau (capteurs et actionneurs) /THO90/.

#### **I-8-4- Conclusion**

L'effet de panique et/ou l'effet de mode, des années 70-80, a provoqué une prolifération de solutions technologiques particulières, sous forme d'îlots d'automatisation, qui ont été additionnées et utilisées à mauvais escient au sein des entreprises pour améliorer leur productivité. Cette approche purement technologique de l'automatisation a très vite conduit à une saturation en terme de productivité et de qualité.

Dans un contexte d'intégration, les fabricants et services d'ingénierie qui sont actuellement les principaux facteurs de blocage doivent essentiellement effectuer un effort d'homogénéisation et de standardisation.

Dans le domaine de la conception, les méthodes doivent s'orienter vers une approche de plus en plus systémique, c'est à dire intégrée et tenant compte à la fois des fonctions, des données et de la dynamique du système à concevoir.

Mais le travail le plus délicat reste la définition d'une architecture de référence d'un système de production sur laquelle on pourra calquer des méthodes de gestion et de conception intégrées.

### **I-9- Conclusion**

Par l'évolution des technologies et la complexité des systèmes de production, l'activité de conception devient un travail de plus en plus difficile à maîtriser.

Les méthodologies et les méthodes de conception doivent adopter une démarche rigoureuse et de plus en plus systématique en tenant compte de certaines propriétés de base, qui caractérisent les systèmes de production, telles que :

- flexibilité,
- modularité,
- structuration,
- hiérarchisation,
- et intégration.

La principale difficulté concerne le choix et l'utilisation d'un formalisme de représentation pour établir des modèles pertinents en respectant au mieux ces différentes caractéristiques et en adoptant une approche intégrée. Des techniques de modélisation multiples et complémentaires doivent donc impérativement être utilisées pour l'analyse et la conception des systèmes de production.

Une synthèse des différentes méthodes et outils de modélisation, c'est à dire des différents formalismes pour spécifier et décrire un système, a été effectuée /CAL90/ /LES91/ /ALA88b/. Elle a mis en évidence quelques outils méthodologiques complémentaires destinés à traiter respectivement chacun des aspects d'un système de production et pour lesquels la prise en compte du temps est plus ou moins importante :

- parmi les modèles dits statiques, nous trouvons les diagrammes hiérarchiques (SADT) pour l'analyse fonctionnelle d'un système et le modèle entité/association (MERISE) pour l'analyse du système d'information,

- parmi les **modèles cinématiques**, c'est à dire pour lesquels le temps intervient uniquement sous forme de règles de synchronisation montrant l'enchaînement des actions, nous trouvons les diagrammes organisationnels utilisés dans le modèle conceptuel des traitements de MERISE et des réseaux GRAI pour l'analyse du système décisionnel,

- parmi les **modèles dynamiques** permettant de modéliser et d'analyser le comportement et l'évolution d'un système, nous trouvons les **graphes à état/transition** et les **graphes de type stimuli/réponse** qui sont dérivés des graphes à état/transition et qui sont particulièrement adaptés à la description des systèmes réactifs.

Les graphes stimuli/réponse permettent de décrire un enchaînement d'actions suite à l'occurrence d'un événement /CAL90/. Parmi les graphes à état/transition, nous pouvons citer les RdP et les diagrammes à état fini pour analyser le comportement du système de production, le GRAFCET /BLA86/ /DAV89/ pour la spécification et la programmation des automatismes et les STATECHART /HAR87/ pour introduire la notion de raffinement permettant de décrire hiérarchiquement une activité quelconque.

Ils sont complémentaires dans le sens où ils sont destinés à traiter les différents aspects d'un système de production. Cependant ces outils n'ont pas été conçus pour être intégrés dans une même démarche de conception, ce qui nécessite d'établir les différents modèles séparément.

Le projet CASPAIM, qui initialement couvrait uniquement l'aspect commande en utilisant principalement le formalisme RdP, s'est vite orienté vers l'analyse et la conception des autres composantes d'un système de production. Telle est l'ambition depuis quelques années de l'équipe du LAIL à travers ce projet en utilisant plusieurs formalismes tout en essayant de les intégrer dans une démarche unique de conception.

Sa contribution à l'intégration, dans un contexte CIM, s'inscrit plutôt dans un cadre d'intégration par la gestion temps réel suivant une approche ascendante.

## Partie 2 : LE PROJET CASPAIM - ÉVOLUTION, DÉFINITIONS ET DÉMARCHE

### II- LE PROJET C.A.S.P.A.I.M. - GÉNÉRALITÉS

#### II-1- Origines et objectifs

La méthodologie C.A.S.P.A.I.M. est le fruit des travaux de l'équipe S.E.D. (Systèmes à Événements Discrets) du LAIL créée à l'initiative du Professeur GENTINA au début des années 80. Les activités de l'équipe sont organisées autour d'un thème central intitulé :

*C.A.S.P.A.I.M. : "Conception Assistée des Systèmes de Production Automatisés en Industrie Manufacturière"*

A l'origine, ces axes de recherche étaient principalement orientés vers le développement d'une chaîne CAO (i.e. ensembles d'outils informatiques dans un cadre de génie automatique). Ces outils s'inscrivent dans un cadre d'étude des systèmes de production automatisés de type manufacturier et notamment destinés à l'analyse et à la conception de systèmes de commande ou plus généralement du système de pilotage.

L'ambition était alors d'automatiser ou d'assister le processus complet de conception d'un système de commande performant, depuis la définition du cahier des charges jusqu'à l'implantation finale sur site suivant une approche homogène.

Pour cela, tous les aspects relevant des systèmes automatisés de production, d'un point de vue général, ont été pris en considération et en particulier :

- (i) **la description des produits** : types de pièces, gammes opératoires, ...
- (ii) **les contraintes et les objectifs de production** : délais, débits, temps de cycle, ...
- (iii) **la définition des stratégies de contrôle et de pilotage** du système de production,
- (iv) **et la représentation fonctionnelle et matérielle des architectures retenues** : ensemble des organes opératifs (machines, robots, ...), des systèmes de transport véhiculant les flux de produits pour le système de fabrication, et ensemble des organes informatiques ainsi que des réseaux de communication véhiculant les flux de données (informations et commandes) pour le système de commande.

L'équipe SED du LAIL s'est donc efforcée de choisir des formalismes adéquats pour obtenir une représentation facilement compréhensible et interprétable, d'où l'utilisation de préférence d'un formalisme de type graphique.

Elle a, aussi, pris conscience de l'importance et de la nécessité d'une technique de représentation, basée sur la définition de concepts de modélisation, pour obtenir une description cohérente et concise du système à différents niveaux d'abstraction.

Le formalisme RdP /BRA83/ /DAV89/ a été adopté pour son pouvoir d'expression des principales caractéristiques dans le domaine des systèmes répartis telles que le parallélisme, les structures de contrôle, les problèmes de concurrence ou de conflits d'accès aux ressources critiques, les primitives de synchronisation et de communication, etc ...

Un besoin de **structuration** a vite été ressenti pour :

- pallier à un des principaux inconvénients du formalisme RdP concernant le manque de clarté au niveau des graphes développés, qui deviennent rapidement incompréhensibles dès que croît la taille de l'application,

- conférer au modèle de bonnes propriétés comportementales (réinitiability, vivacité et finitude) par construction à l'aide de **primitives de base** de structuration vérifiant certaines propriétés initiales,

- et enfin, adopter une **approche** qui soit la plus **modulaire** et **hiérarchique** possible.

Une extension des RdP de base aux RdP Structurés (RdPS) a alors été effectuée /COR79/ /COR80/.

La méthodologie CASPAIM est principalement basée sur une **approche orientée produit** ou **flux de produit**. Ainsi, l'analyse et la conception d'un système de commande sont effectuées à partir d'objectifs formulés à travers certaines caractéristiques des produits à fabriquer. Ces caractéristiques expriment les différentes opérations à réaliser sur chacun d'entre eux sous forme d'une gamme de fabrication simplifiée. Chaque type de produit à fabriquer définit alors un objectif particulier du système devant être réalisé par un ensemble d'organes opératifs ou moyens de production.

La prise en compte de certaines caractéristiques inhérentes aux différents produits, telles que leur type et leur état d'évolution en cours de fabrication, au sein du graphe de commande fut alors nécessaire.

De même, la nécessité d'une **représentation hiérarchique** du système de commande s'imposait pour mettre en évidence les différents niveaux décisionnels et permettre le paramétrage et la reconfiguration du système de production via la commande.

Les extensions RdP Adaptatifs /COR84/ et Colorés /PET80/ /JEN86/ ont été ajoutées au modèle de base pour intégrer ces différentes caractéristiques de la méthodologie CASPAIM.

D'autres modèles ont été introduits pour obtenir une description cohérente et complète du système de commande et pour représenter certaines parties spécifiques et complémentaires (décisionnelle, procédé ...).

Ces modèles supplémentaires rendent le système de commande plus autonome en établissant des communications avec les niveaux supérieurs et inférieurs. Par exemple, ces modèles peuvent être issus de l'application d'une stratégie de pilotage particulière ou de l'application et du résultat d'un enchaînement particulier d'actions destinés aux différents organes opératifs.

## **II-2- Représentation hiérarchique et fonctionnelle d'un système de gestion/contrôle /EST92/ /DEL90/**

### **II-2-1- Les différents niveaux**

Nous pouvons représenter le système de commande (gestion et contrôle) d'un système de production en plusieurs niveaux (figure I-2-1) dont les décisions élaborées à travers cette hiérarchie vont du plus stratégique (planification prévisionnelle) au plus opérationnel (commande effective des équipements de production).

Il est à noter que l'ambition du projet CASPAIM est de concevoir, dans un premier temps, le système de pilotage et donc principalement l'architecture d'unités de contrôle locales. Ainsi, la préoccupation majeure de ce projet est l'interconnexion de ces différentes unités locales et non pas a priori leur conception qui relève d'une commande locale aux équipements de production et pour laquelle des outils dédiés existent (CFAO, CAO robotique ...).

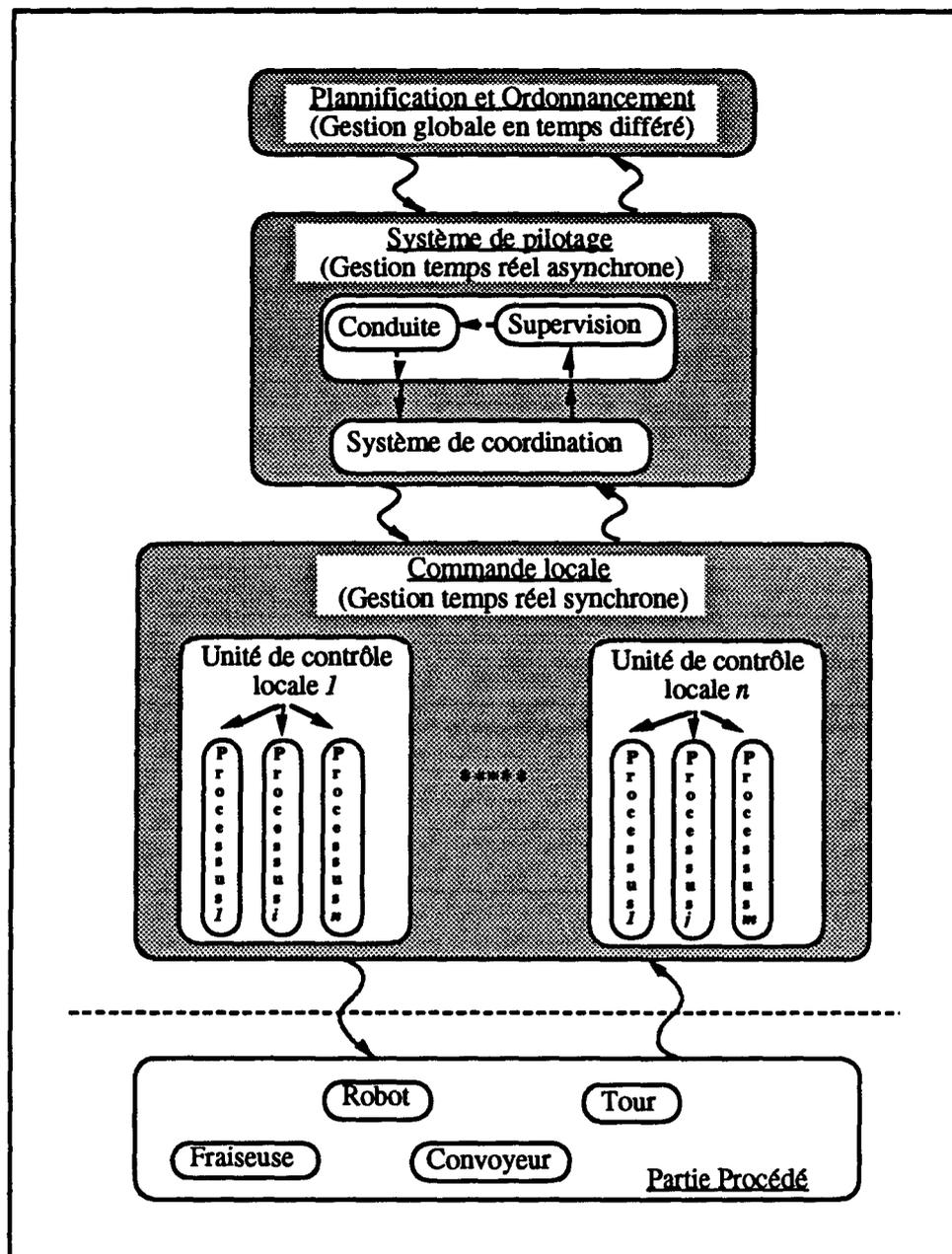


Figure I-2-1 : Les différents niveaux de gestion/contrôle

## II-2-2- Aspect planification et ordonnancement

### II-2-2-1- La planification

La planification s'effectue grossièrement suivant trois niveaux /BAR90/ et pour chacun d'entre eux un ensemble d'informations est généré sous forme respectivement d'un Plan Stratégique et Industriel de Production (PSIP), d'un Plan Directeur de Production (PDP) et d'une Expression des Besoins Nets (EBN).

Le PSIP effectue une prévision sur des familles de produits susceptibles d'être

fabriquées à partir des ventes connues ou estimées de ces familles. L'horizon de planification, à ce niveau, est généralement d'une année, découpé en périodes de réactualisation d'un mois.

Le PDP traduit les objectifs exprimés en famille par le PSIP pour chaque type de produit. L'horizon de planification est ici de l'ordre de quelques mois avec des périodes de réactualisation d'une semaine.

L'EBN calcule les besoins nets en fonction des ordres de fabrication (OF) exprimés à partir des dates dues estimées pour chaque produit apparaissant dans le PDP.

Des ordres d'achats (OA) ainsi que d'autres OF sont réalisés, pour effectuer un approvisionnement en matières premières ou en produits intermédiaires apparaissant au niveau de la nomenclature d'un produit initial du PDP.

Et pour chaque période de réactualisation du PDP, une quantité de produits, de types différents et regroupés en lots de fabrication, est calculée en fonction de certaines contraintes économiques et techniques.

Les OF calculés par l'EBN ne sont que des propositions puisqu'ils ne tiennent pas compte de la capacité des moyens de production.

#### **II-2-2-2- L'ordonnancement**

L'ordonnancement génère un programme de production en essayant de répartir la charge des moyens de production, en fonction de leur capacité et leur disponibilité, en effectuant un ensemble d'ordonnements possibles pour réaliser les différentes opérations des OF constituant un lot.

Il effectue donc une **affectation** des opérations à un ensemble de moyens de production en fonction de la flexibilité de choix des machines.

#### **II-2-3- Aspect pilotage**

##### **II-2-3-1- Gestion temps réel**

Le système de pilotage (commande centralisée) consiste en fait à gérer la production en temps réel pour réaliser le programme de production généré par le niveau supérieur. A ce niveau, on distingue le système de conduite/supervision et le système de coordination.

##### **II-2-3-2- Système de conduite/supervision**

Les notions de conduite et de supervision se distinguent par l'aspect commande que possède la conduite alors que la supervision recouvre un aspect purement informatif /DEL90/.

L'aspect conduite doit faire respecter le programme de production établi en utilisant le système de coordination qu'il contrôle.

Pour cela, en fonction des ordonnancements admissibles et du degré de liberté, issu de la flexibilité d'affectation (choix des machines) et de la flexibilité de transfert (affectation des moyens de transport), relatif au routage des produits, il décide en temps réel de l'ordonnement à respecter.

Cet **ordonnement temps réel** résulte d'une certaine stratégie ou politique de pilotage à suivre qui se traduit par le choix d'un mode de coordination particulier. Ce choix est effectué à travers un certain nombre de traitements tels que :

- **Résolution des conflits** rencontrés par le système de coordination et émanant soit de plusieurs demandes simultanées d'allocation d'un même moyen de production, soit de plusieurs demandes d'accès simultanées à un même lieu physique.

Cette résolution est effectuée en évaluant des priorités en fonction d'un certain nombre de paramètres (urgence d'un produit par rapport aux dates dues, charge d'un moyen de production ...).

- **Choix d'un chemin** de transfert entre deux machines pour un produit.

Un **routage** des produits est effectué par affectation des moyens de transfert en fonction de la flexibilité du système de transport et en fonction de la flexibilité d'ordre des opérations.

- **Gestion des modes de fonctionnement** normaux, suite à un changement de production, ou dégradés, suite à un aléa de fonctionnement.

La supervision a plutôt un rôle d'observation en surveillant le déroulement du programme de production en cours et l'état du procédé (produits et moyens de production) en temps réel à partir d'informations collectées sur ce dernier.

Elle effectue ainsi un **suivi des produits** et un **suivi des moyens de production**. Ce suivi a pour but, d'une part, d'évaluer et d'analyser les performances du système, et de connaître l'état d'avancement d'un lot de fabrication. Il doit aussi permettre la détection de toute anomalie ou aléa de fonctionnement du procédé pour en informer immédiatement le système de conduite pour qu'il puisse réagir en conséquence.

### **II-2-3-3- Système de coordination**

Le système de coordination assure le **séquencement** ou l'ordre d'exécution des opérations établi par le pilotage pour réaliser les différents produits.

Il effectue une demande d'exécution d'opérations au niveau de la commande locale et en reçoit des comptes rendus de fin d'exécution.

Chacune de ces opérations correspond soit à un traitement élémentaire (de type usinage, fraisage, perçage ...) soit à un transfert élémentaire d'une zone opératoire ou, d'une zone de stockage intermédiaire, vers une autre.

Chaque enchaînement d'opérations nécessite une **coopération** entre les différents moyens en question réalisée par l'intermédiaire d'un ensemble de **synchronisations** et de **communications** inter-processus.

Chaque processus séquentiel représenté au niveau de la commande locale d'un moyen de production (figure I-2-1) réalise une opération élémentaire. Et pour un moyen de production donné, le système de coordination choisit le **type d'opération** à réaliser selon la gamme de fabrication d'un produit tel que l'exécution d'un traitement particulier au sein d'un centre d'usinage ou d'un transfert particulier au niveau d'un robot.

#### **II-2-4- Aspect commande locale**

La commande locale assure donc l'exécution de chacun des traitements élémentaires à travers les différents processus qui réalisent le **séquencement** et l'application des différentes **actions élémentaires** exécutées par les différents **actionneurs** et ce en fonction des comptes-rendus des capteurs.

Ces processus sont répartis et regroupés au sein d'unités de contrôle locales représentant les organes informatiques de commande (API, commandes numériques, calculateurs ...), dédiés à un ou plusieurs organes opératifs (robot, tour, fraiseuse ...).

### **II-3- Principes en conception**

#### **II-3-1- Notion de réutilisabilité**

Les principes et l'approche de conception issus du génie logiciel, et plus particulièrement les méthodes orientées objet, ont fortement inspiré la démarche CASPAIM pour la conception de logiciels de commande de qualité, en terme de fiabilité et de maintenabilité.

Une des propriétés intéressantes du génie logiciel, notamment orienté objet, est la notion de **réutilisabilité** associée à celle de **Composant Logiciel Réutilisable (CLR) /BOO87/**. En effet, partant du constat effectué par plusieurs études (groupe de travail PTA pour les API /TIX89/ et K. ORR pour le développement en logiciel /JAU90/) énonçant que seule une partie minime, de l'ordre de 20 % environ, du code écrit pour une application donnée est originale. Il est donc intéressant de concevoir des outils offrant des mécanismes de réutilisation afin de minimiser les duplications.

Un CLR représente ainsi un **module (objet) pré-défini**, élémentaire et

indépendant pouvant être dupliqué avec un coût quasiment nul.

Et seule une approche objet, par l'intermédiaire de la **notion d'objet** et des concepts qui en découlent tels que **l'encapsulation, la généricité et l'instanciation**, permet de mettre en œuvre de tels mécanismes.

L'idée de base est alors de disposer d'une bibliothèque riche en CLR pré-définis à partir desquels un nouveau système sera conçu en les combinant judicieusement suivant une **analyse méthodique**. Cela permettra ainsi de /TIX89/ :

- réduire les coûts de développement,
- améliorer la qualité,
- et accélérer le développement.

Cette notion de CLR est souvent comparée à la brique du maçon ou au circuit intégré de l'électronicien représentant le module de base pour la construction de toute application.

Néanmoins, l'effort est porté au préalable sur :

- **l'identification** de ces **modules** qui consiste à rechercher les invariants fonctionnels et/ou structurels élémentaires et représentatifs du contexte d'étude en question,
- et la **conception** au préalable de ces **modules** génériques, car la qualité d'une application dépend, en premier lieu, de la qualité de ceux-ci.

La qualité de ces modules ou de ces CLR dépend du respect de quatre propriétés de base :

- **(p1) Modularité** : un CLR doit représenter un module de base indivisible et caractéristique du domaine d'application (invariant fonctionnel et/ou structurel).
- **(p2) Abstraction** : un CLR doit permettre d'appréhender facilement une application suivant une approche rationnelle et progressive par affinements successifs et donc offrir plusieurs niveaux d'abstraction.
- **(p3) Masquage d'informations** : les interactions entre CLR doivent être minimisées. Pour cela, l'interface permettant d'accéder aux différents services offerts par un CLR doit être indépendante de la façon dont les fonctionnalités, réalisant ces services, sont effectuées en interne. Ce qui permet d'obtenir une certaine intégrité des modules et de minimiser les répercussions que peut avoir la modification d'un module sur d'autres modules.
- **(p4) Indépendance fonctionnelle** : cette indépendance fonctionnelle se mesure par la forte cohésion, relative à la force interne d'un module, et le faible couplage entre les modules de base.

### II-3-2- Cycle de développement

A partir du concept de CLR, le processus de développement (figure I-2-2), calqué sur la notion de cycle de vie en génie logiciel /MEY86/ et pour lequel la phase de conception préliminaire ou générale est la plus importante, consiste à effectuer :

- une **formalisation des besoins** ou une **spécification initiale** qui revient à définir précisément les objets ou concepts manipulés à partir de la description non formelle des objectifs exprimés dans le cahier des charges,

- une **conception préliminaire** qui revient à définir une architecture (conception architecturale) ou une certaine organisation d'un ensemble de modules de base mis en évidence suivant une **analyse descendante** et à partir des besoins formalisés en spécification,

- une **conception détaillée** qui revient à générer la structure complète du système suivant une approche ascendante (synthèse) et à partir de la structure interne des modules élémentaires et de leur association (structure générale) issue de la conception architecturale,

- et une **implantation** du résultat suivant une architecture matérielle opérative et informatique.

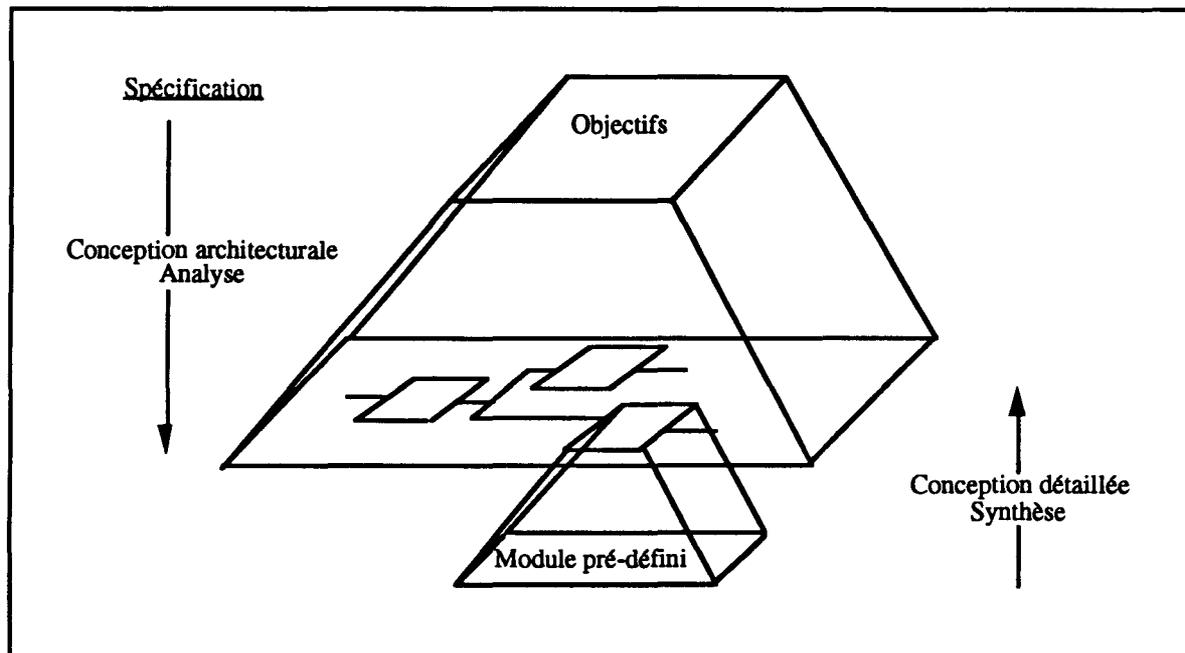


Figure I-2-2 : Processus de développement

Cette démarche nécessite une méthode **rigoureuse et systématique** en phase d'analyse permettant de définir une identification et une organisation correcte (validation), cohérente (vérification) et optimale (évaluation) de ces modules.

Si la notion de CLR est souvent comparée à la brique du maçon, la qualité de la méthode d'analyse correspond à la qualité du ciment utilisé en construction.

Comme énoncé au paragraphe I-8-3-1, le cycle de vie est fortement lié à l'étape considérée du cycle d'abstraction d'un système pour lequel :

- le niveau conceptuel (Pourquoi et Quoi) correspond à un degré d'abstraction permettant d'appréhender le problème sans faire référence à une solution particulière mais en exprimant les besoins de manière formelle,
- le niveau organisationnel (Qui, Où et Quand) correspond plutôt à l'étape de conception préliminaire et à un niveau d'abstraction intermédiaire,
- et le niveau réalisationnel ou opérationnel (Comment) correspond à l'étape de conception détaillée avec un degré d'abstraction très faible puisqu'on fait référence à une solution particulière d'implantation.

### **II-3-3- Approche en prototypage /MEY86/ /CHO88/**

Le processus de développement est principalement basé sur une approche de type **prototypage lent**, par opposition au prototypage rapide, en sachant qu'un **prototype** est un **modèle directement exécutable ou simulable**.

Ces notions de prototypage lent et rapide sont issues des deux grandes tendances adoptées pour développer un produit logiciel dans le domaine du GL :

En effet, on peut distinguer deux variantes en prototypage /MEY86/ :

- Concernant le prototypage rapide, on génère un premier prototype, par l'intermédiaire d'un langage de haut niveau, pour tester certaines hypothèses et, une fois le résultat obtenu, on ne conserve pas le prototype et le développement repart de zéro. On parle de **prototype jetable**. Le système final est alors réalisé dans un autre langage dont la connaissance préalablement acquise facilite la tâche.

- Dans le second cas, il s'agit de générer un modèle complet, représentant le système final, par additions et affinements successifs suivant une démarche typiquement basée sur la notion de cycle de vie dont le processus de développement a été évoqué ci-dessus (figure I-2-2). Dans ce cas, on parle de **prototype incrémental**.

L'approche utilisée par le projet CASPAIM est donc de type prototypage lent permettant ainsi de générer progressivement un **modèle exécutable par simulation** du système de commande.

## II-3-4- Vérification et validation

Comme décrit dans le paragraphe I-8-3-1, chaque étape de conception est caractérisée par un processus itératif de type "essai-erreur" (figure I-1-6).

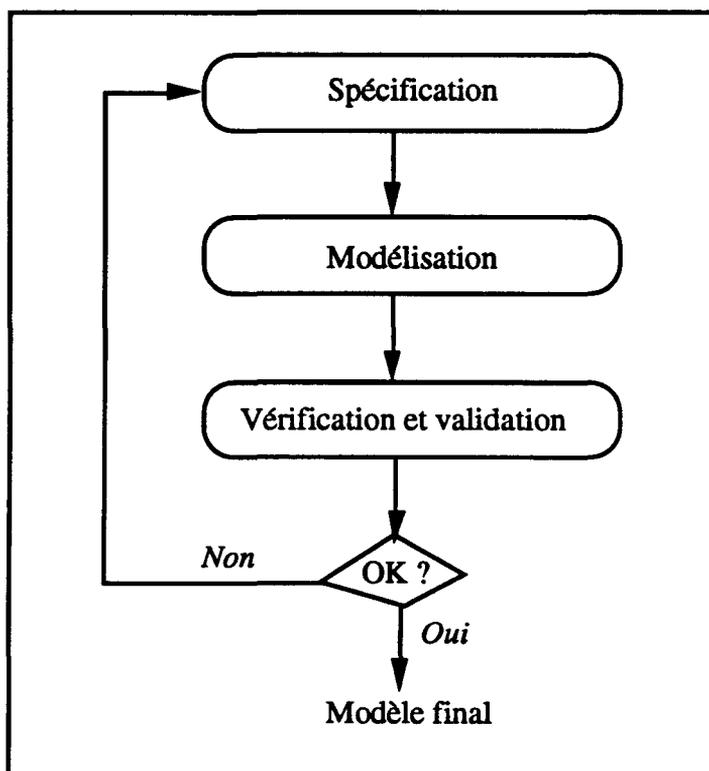


Figure I-1-6 : Processus de conception

Il faut aussi rappeler que l'étape de vérification permet de tester la bonne construction du modèle généré. Elle permet de vérifier la cohérence et la complétude d'un modèle de spécification ou certaines propriétés comportementales émanant de la structure (syntaxe) d'un modèle de commande telles que la réinitiability, la vivacité, la finitude ou la terminaison ...

L'étape de validation permet de tester si la solution, exprimée par le modèle généré, correspond bien aux besoins exprimés (sémantique) et d'évaluer l'efficacité de cette solution en terme de performance (analyse quantitative) et de qualité (choix d'une stratégie de production).

La vérification peut s'effectuer a posteriori par l'intermédiaire d'outils mathématiques (analyse statique) ou bien par simulation (analyse dynamique) testant les propriétés structurelles du graphe ou a priori par construction (Par. II-1-1) en suivant une structuration bien définie.

L'étape de validation peut s'effectuer suivant deux approches :

- Les démarches analytiques relevant de la programmation linéaire, des réseaux de file d'attente et des RdP stochastiques permettent d'effectuer un prédimensionnement par

évaluation des flux.

Bien qu'elles produisent rapidement des résultats, la nature de ceux-ci restent malheureusement trop approximatifs du fait des hypothèses restrictives et des simplifications nécessaires pour appréhender la complexité des systèmes étudiés.

- Les démarches de simulation du comportement dynamique d'un système, à partir d'un modèle complet, afin d'en effectuer une évaluation plus fine et plus proche de la réalité. Néanmoins, ces techniques semblent assez lourdes, en temps de calcul, et sont mal adaptées pour effectuer une simulation de type générative /CAV87/, c'est à dire permettant, en boucle fermée suivant une heuristique, de rechercher une configuration optimale suivant un ou plusieurs critères d'optimisation.

Par ailleurs, ces deux techniques sont complémentaires dans le sens où les méthodes analytiques permettent un prédimensionnement du système par évaluation des flux, essentiellement en régime permanent. Un ensemble de solutions admissibles peuvent être ainsi présélectionnées.

Ensuite, la simulation permet d'affiner ces résultats notamment en étudiant les régimes transitoires et d'effectuer une optimisation in fine.

L'approche CASPAIM tente d'allier ces deux approches suivant ce point de vue.

Si on parle de "validation" par simulation d'un modèle exécutable, le choix d'une technique est intimement lié à la démarche utilisée pour le développement de ce modèle, c'est à dire de type prototypage rapide (outils de simulation généraux) ou prototypage lent (outils de simulation dédiés à une méthode de conception).

### II-3-5- Conclusion

En résumé, l'approche CASPAIM est une méthode combinant judicieusement, à l'instar des méthodes de COO, une démarche **descendante**, plus ou moins systématique (analyse), et une démarche **ascendante** qui cherche à favoriser la **réutilisabilité** (synthèse). L'approche descendante, qui est la plus couramment utilisée, agit par **affinements successifs** suivant une décomposition visant à mettre en évidence des éléments de base génériques.

Enfin, une des mises en œuvre de la notion de CLR concerne principalement les primitives ou modules de structuration utilisés pour générer un modèle exécutable du système de commande à partir de la spécification et suivant une approche de type prototypage lent. Cela permet d'intégrer le processus de **vérification** de certaines propriétés structurelles au processus de **construction**.

## II-4- Évolutions

A la fin des années 80, une première phase du Projet CASPAIM a pu être menée à son terme.

En effet, cette première phase a permis de définir et d'élaborer des concepts de structuration en modélisation destinés à appréhender certaines contraintes et certains niveaux de complexité relatifs aux systèmes de production flexible tels que :

- La complexité des produits à fabriquer suivant des procédés différents, soit par transformation (usinage) soit par composition (assemblage), et la cohabitation de plusieurs types ou gammes de produits au sein d'un même système de production.

- La flexibilité, la complexité et la taille des systèmes de production : les systèmes de fabrication deviennent très paramétrables et les systèmes de transport deviennent eux-mêmes très flexibles.

L'organisation de l'architecture matérielle de production nécessite d'évaluer différents choix ou options de réalisation, issus de cette flexibilité, aussi bien au niveau des équipements de fabrication que des modalités de transport.

- La complexité du système de commande est à l'image de celle du système de production qui doit lui-même être très flexible, d'où la nécessité d'un contrôle stratégique :

- . à long terme, pour la planification globale au niveau d'un atelier,
- . à moyen terme, pour l'ordonnancement des séquences de production sur des sous-ensembles de production et des périodes restreintes,
- . à court terme, pour les traitements réactifs suite à l'occurrence d'un conflit d'accès, d'un indéterminisme quelconque, ou d'une défaillance.

- La complexité du système de surveillance chargé de la sûreté de fonctionnement et de la gestion des modes dégradés dans le cadre d'un parallélisme très important.

Depuis les années 90, cette méthodologie proposée a totalement été remise en cause. En effet, bien que cette approche reste satisfaisante pour aborder la complexité des systèmes étudiés à cette époque, elle est apparue insuffisante pour l'analyse d'architectures de production plus complexes.

Des concepts supplémentaires de structuration et une nouvelle approche intitulée CASPAIM2 basée sur ces concepts ont été définis pour appréhender des facteurs de complexité bien plus importants tels que :

- Des produits plus complexes parfois gérés momentanément par lot ou sous-ensembles cohérents devant subir des assemblages en une ou plusieurs phases définissant ainsi des produits intermédiaires semi-finis.

- Des ressources flexibles complexes nécessitant à l'évidence une modélisation fine de leur comportement dynamique pour optimiser la commande.
- Des gammes comportant une plus grande flexibilité à gérer, du fait de la complexité et de la flexibilité toujours plus forte des ressources de production.
- La nécessité de prendre en compte la modélisation du procédé, afin d'assurer à la fois la commande prédictive d'ensemble du système et sa surveillance.
- La réactivité et le caractère synchrone du contrôle de bas niveau apparaît également comme une contrainte forte pour le pilotage et la coordination des tâches et, d'une certaine manière, dans les décisions relevant d'une réévaluation en ligne de l'ordonnancement des tâches.

## Partie 3 : SPÉCIFICATION ET CONCEPTION PRÉLIMINAIRE

### III- SPÉCIFICATION ET CONCEPTION PRÉLIMINAIRE

#### III-1- Introduction

Les phases de spécification et de conception préliminaire, ou générale, constituent l'objet principal de l'étude présentée dans ce mémoire. Cette étude a été menée dans le cadre du projet CASPAIM 2. Elle est basée sur la définition d'un ensemble de notions et de concepts de modélisation à partir desquels les principes issus de la démarche CASPAIM 2 /CRU91/ ont pu être mis en œuvre.

La phase de spécification est une étape importante et délicate, car elle conditionne énormément le déroulement et le résultat final en conception. Une bonne spécification va permettre de réduire considérablement les coûts de développement, en conception, ainsi que les coûts de maintenance, en exploitation.

De manière générale, la spécification a pour objectif, dans un premier temps, la formalisation des besoins, exprimés dans le cahier des charges, de manière à être exploitée comme point de départ en conception. D'ailleurs, elle doit permettre une vérification et une validation de ces besoins pour détecter et éliminer le plus tôt possible les erreurs et les défauts, issus du cahier des charges, et donc d'éviter de propager inutilement ces erreurs en conception.

Comme énoncées au paragraphe II-3-4, la vérification et la validation, notamment des besoins, peuvent s'effectuer soit a posteriori, par l'intermédiaire d'outils d'analyse spécifiques soit a priori, par construction, c'est à dire, intégrées au processus de conception. Pour cela, les spécifications doivent être effectuées sous une forme rigoureuse et non ambiguë suivant une syntaxe et une sémantique bien définies. Dans ce dernier cas, l'étape de conception préliminaire intègre cette phase d'analyse par développement des besoins suivant une structuration bien définie.

Le projet CASPAIM a adopté ce dernier point de vue pour spécifier et développer l'architecture du système de commande de manière cohérente et complète.

#### III-2- Le cahier des charges

Le cahier des charges, rédigé en langage naturel, doit constituer un document contractuel, complet et sans ambiguïté dans lequel sont exprimés les besoins du client. Ces besoins portent essentiellement sur les fonctionnalités devant être remplies par le système, les conditions matérielles de son fonctionnement, les objectifs de production ou les exigences en matière de coût.

La description d'un cahier des charges est essentiellement basée sur trois types d'éléments /AUG87/ :

(i) **Les requêtes** des clients : elles sont généralement classées suivant leur niveau d'exigibilité et correspondent ainsi à des exigences absolues, des souhaits ou de simples options.

(ii) **Les contraintes** : elles sont imposées par l'environnement du système existant ou encore inexistant mais déjà défini telles que la configuration matérielle d'implantation ou des caractéristiques d'unités de production amont et aval.

(iii) **Le glossaire** : il permet une définition de chaque terme utilisé lors de l'élaboration du cahier des charges.

Il est clair que le cahier des charges ne doit jamais fournir a priori d'éléments de solution qui consisteraient à la prise en compte de la solution avant celle des objectifs. Si certains équipements de production (machines, robots ...) ont déjà été choisis au moment de l'appel d'offres, ils doivent alors être considérés comme des contraintes supplémentaires et non comme des éléments de solution.

Malheureusement, le cahier des charges constitue un document informel établi par le client et comporte donc, naturellement, de nombreuses erreurs qui en font un document directement inexploitable par le concepteur.

De ce fait, il est difficilement vérifiable et engendre généralement de nombreux défauts, en phase de spécification, dont les principaux sont énoncés dans le paragraphe suivant.

### **III-3- Les problèmes de spécification**

Les principaux défauts qui ont été répertoriés sont les suivants :

(i) **L'omission** (ou silence) : il y a incomplétude résultant de l'absence d'information concernant une ou plusieurs caractéristiques du problème.

(ii) **L'ambiguïté** : il y a plusieurs interprétations possibles pour un élément donné.

(iii) **La contradiction** (ou incohérence) : plusieurs éléments définissent de manière incompatible une même caractéristique du problème.

(iv) **Le bruit** : certains éléments font référence de manière redondante, en partie ou en totalité, à certaines caractéristiques déjà définies complètement ou d'autres sont tout

simplement inutiles à la phase d'analyse.

(v) **La sur-spécification** : certains éléments correspondent à des caractéristiques non pas du problème mais d'une solution possible.

#### **III-4- Objectifs d'une spécification /MEY87/ /CAL90/**

Ainsi, le cahier des charges constitue un document établi par le client suivant un langage informel qui lui est propre, donc de ce fait, ce document :

- est totalement **inexploitable en conception**,
- et comprend une **multitude d'erreurs** ou de défauts au niveau de l'expression des besoins.

Dans un premier temps, la spécification doit permettre le passage ou la traduction de la description non formelle que représente le cahier des charges (besoins exprimés) en une **définition précise des objets** manipulés par le système ainsi que des opérations à effectuer sur ces objets (besoins formalisés).

Elle doit définir, ainsi, de façon aussi complète et aussi peu ambiguë que possible, les caractéristiques externes que le produit, à concevoir, doit présenter à ses utilisateurs potentiels ou au système dans lequel il s'insère /MEY87/.

Cette définition précise des objectifs vise à fournir un ensemble d'informations de base décrivant uniquement le problème suivant une **notation compréhensible et directement exploitable en conception**.

Une étude portant sur les différentes causes d'échec de neuf grands projets américains, dans le domaine de la gestion, a été menée. Elle a montré que la principale cause concerne une mauvaise spécification des besoins /JAU90/.

Une autre étude effectuée par B.W Boehm /MEY87/, pour certains grands projets dans le domaine du génie logiciel, a montré que le **coût de correction d'une erreur de définition** est proportionnellement croissant en fonction du niveau d'avancement dans le cycle de vie où elle est effectivement détectée (rapport de 100 environ entre la phase de spécification et d'exploitation).

Ces coûts sont beaucoup plus simples à mettre en évidence pour la partie **maintenance** qui est principalement de type **corrective et évolutive**. Cette partie nécessite environ 2/3 du coût total dans le domaine du génie logiciel et des systèmes électroniques /CAL90/.

De même, C.V. Ramamoorthy a constaté que 30% des erreurs trouvées durant le test et la mise en fonctionnement sont dues à une mauvaise compréhension du problème et très souvent à la non-complétude d'expression des besoins dans le cahier des charges /CAL90/.

Bien évidemment, pour pallier ou réduire les conséquences de ce type de problème, qui est malheureusement inévitable, sont nécessités un effort important et une attention considérable dans les phases initiales du cycle de vie (figure I-3-1).

Le résultat est alors une description intermédiaire du système sur laquelle une **vérification** pourra être effectuée très tôt dans le cycle de vie.

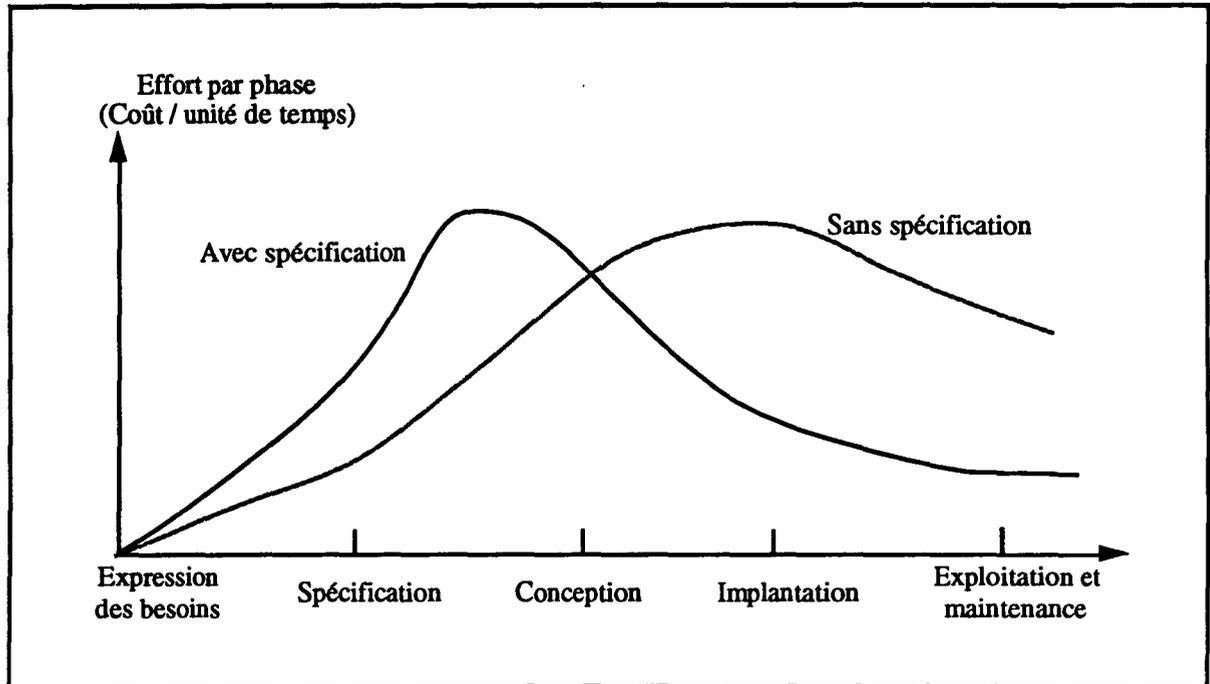


Figure I-3-1 : Effort par phase avec ou sans spécification

Pour **formaliser** à la fois la compréhension d'un problème et l'objectif à atteindre, tout en permettant un point de **vérification** rapide des besoins, il faut disposer d'une description intermédiaire entre le cahier des charges qui exprime plutôt le **Pourquoi**, et la solution développée par les concepteurs qui exprime le **Comment**.

Cet intermédiaire correspond à la formalisation des besoins générant un **document formel vérifiable (le Quoi) /CAL90/** (figure I-3-2).

En conclusion, l'étape de spécification, **phase de dialogue et de réflexion**, est obligatoire au bon déroulement d'un projet /TIX89/.

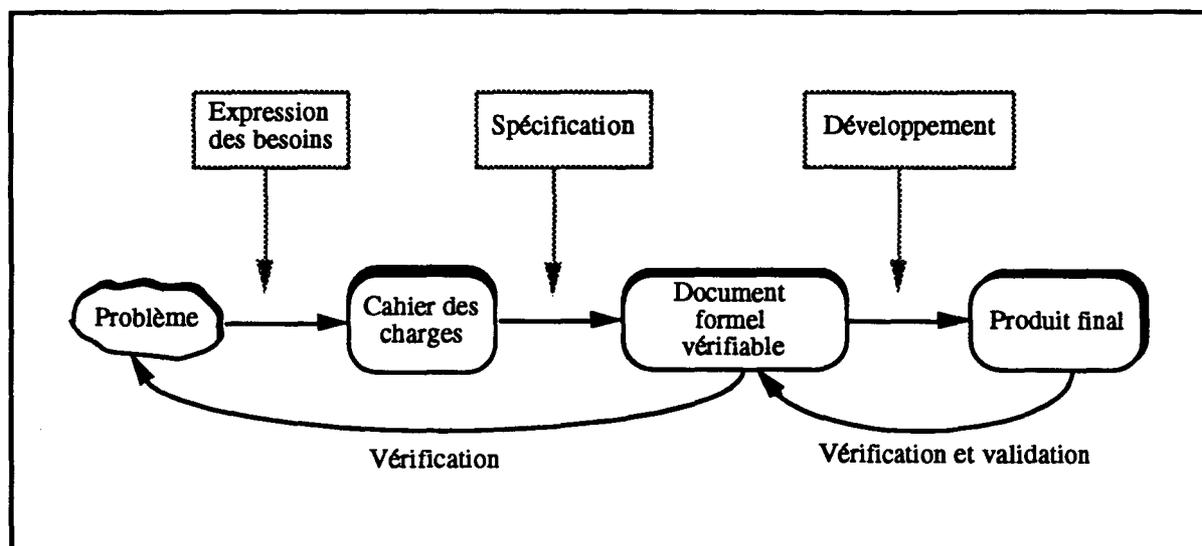


Figure I-3-2 : Intérêt d'une spécification

### III-5- Spécification formelle /GAU88/ /CHO88/ /CHO86/

L'étape de spécification doit être indépendante de toute mise en œuvre sans faire appel à des considérations techniques, et notamment, sans nécessiter des connaissances informatiques particulières.

Certaines études s'accordent à affirmer qu'il est nécessaire d'écrire des spécifications du système que l'on veut réaliser (Par. III-3) et que ces spécifications doivent être **formelles**.

Une spécification est formelle lorsqu'elle est écrite à l'aide d'une notation précise, non ambiguë, dont la **syntaxe et la sémantique** sont bien **définies**.

Une spécification formelle étant et devant être indépendante de toute mise en œuvre, sa **sémantique** définit alors la classe des mises en œuvre possibles correspondant au domaine d'application.

Et pour une même spécification peuvent correspondre plusieurs mises en œuvre qui auront en commun le respect de la spécification. Cette classe de mises en œuvre dans le domaine considéré est d'autant plus large (généricité) que le niveau d'abstraction offert par la sémantique, à travers les concepts de modélisation manipulés en spécification, est élevé.

Cependant, quand une spécification gagne en formalisme, elle perd en lisibilité /GAS89/ et nécessite un certain temps de formation pour appréhender la syntaxe et la sémantique du formalisme ou du langage utilisé en description.

Il existe des méthodes de spécifications semi-formelles dans le sens où seule la syntaxe, de type textuelle ou graphique, est fournie. Ces méthodes fournissent un support à la

réflexion et à l'analyse en offrant, par exemple, des principes de décomposition (SADT), des outils pour manipuler les spécifications et généralement une **notation graphique**. L'absence de sémantique interdit la preuve des propriétés vérifiées par la spécification.

Enfin, notons qu'une spécification formelle permet d'effectuer des vérifications efficaces de cohérence et de complétude et de mieux comprendre le problème parce que la sémantique permet de vérifier que la spécification a bien un sens.

### **III-6- Différents types de spécification**

De manière générale, on peut distinguer trois types de spécification qui peuvent être abordés de manière non-exclusive pour décrire de manière externe un système :

(i) la **spécification fonctionnelle** : elle permet de décrire les différentes fonctions que le système réalise ou doit réaliser, vu de l'extérieur, ainsi que leur organisation ou enchaînement logique permettant d'exprimer un ensemble d'objectifs,

(ii) la **spécification opérationnelle** : elle décrit plutôt le déroulement d'une séquence d'actions pour réaliser chacune des fonctions suivant des contraintes de coopération (synchronisation et communication),

(iii) la **spécification relationnelle** : elle permet de décrire un univers ou une certaine structure d'objets (entités, fonctions ...) reliés entre-eux. Chaque lien comporte une certaine sémantique (composition, appartenance ...).

### **III-7- Caractéristiques d'une bonne spécification**

En conclusion, nous pouvons énoncer les principales caractéristiques d'une bonne méthode de spécification :

-1- décrire des problèmes plutôt que des solutions,

-2- s'appuyer sur une **notation** non ambiguë et de préférence de type **graphique** pour éviter certaines confusions et pour ne nécessiter aucune connaissance informatique,

-3- être **facile d'apprentissage** par utilisation de concepts (sémantique) et de règles de combinaison ou d'association (syntaxe) assez simples,

-4- mettre en œuvre des principes favorisant la **réutilisabilité** (abstraction, modularité, généricité ...),

-5- être rapide et souple d'emploi à travers un outil informatique, support à la méthode, intégrant des aspects de gestion (bibliothèque, archivage, documentation ...) et offrant une interface graphique et conviviale.

### **III-8- Exploitation des spécifications - Conception préliminaire**

#### **III-8-1- Différentes possibilités**

A partir de la spécification formelle et en fonction de sa nature, deux types de traitements sont alors possibles :

- soit cette spécification est directement exécutable auquel cas elle constitue un prototype (prototypage rapide), c'est à dire que la spécification suffit à effectuer une **expérimentation rapide** dont le résultat permettra certaines réflexions qui serviront à développer correctement le produit final.

Dans ce cas, la frontière délimitant la forme descriptive d'un problème (la spécification) et la forme prescriptive (modèle exécutable ou programme d'exécution) tend à disparaître comme pour certaines méthodes issues de l'IA (en particulier le langage Prolog),

- soit cette spécification est utilisée comme point de départ pour **concevoir et générer de manière préliminaire** un modèle (prototypage lent) exécutable.

Ce modèle est alors élaboré par construction en procédant soit par déduction suivant des transformations particulières, soit par utilisation de modules pré-définis tel que l'outil SPEX issu des travaux du LACN de Nancy /PAN91b/, ou par combinaison de ces deux techniques.

Partant du même constat, justifiant la nécessité et l'intérêt d'une spécification formelle (Par. III-3), ces deux modes d'utilisation font l'objet d'une certaine polémique dans le domaine du génie logiciel /MEY87/ et, par conséquent, dans le domaine du génie automatique.

#### **III-8-2- Expérimentation rapide**

Les partisans de cette première approche la justifie en affirmant que les erreurs de définition sont inévitables.

Et donc, la seule chose raisonnable pouvant être effectuée à ce stade, est d'essayer d'en limiter les conséquences en passant très rapidement à l'expérimentation sous forme d'un prototype exécutable. Cela permet de détecter très rapidement les erreurs de définition et leurs conséquences.

L'inconvénient majeur de cette approche porte sur la nécessité d'utiliser un langage de haut niveau permettant de générer un modèle exécutable très rapidement mais de mise en

œuvre peu efficace.

Tel est le cas des outils de simulation où le langage, formalisme de description, est soit spécialisé et dédié par exemple, aux systèmes de production (MAP/1, MAST ...), soit constitue un macro-langage (SLAM, GPSS, SIMCRIPT, QNAP, SIMAN ...) bâti autour d'un langage universel de programmation (Pascal, Fortran ...) /CAV87/.

Cela nécessite par la suite de reprendre le développement à partir de zéro suivant un formalisme différent qui sera très proche ou même identique de celui utilisé en implantation du produit final.

Cependant, ce développement sera facilité en utilisant les informations supplémentaires issues de l'expérience acquise à travers cette expérimentation rapide.

### **III-8-3- Analyse et développement préliminaire**

Cette deuxième approche débute par une analyse effectuée en début de développement (conception préliminaire). Elle a pour avantage la détection et la suppression de toutes les erreurs de définition pouvant apparaître à l'étape initiale.

Il faut alors consacrer un effort considérable aux étapes initiales du cycle de développement, par définition d'outils et de méthodes d'analyse permettant de vérifier la cohérence et la complétude de la spécification, et le bon développement du modèle final à partir de cette spécification.

Il existe trois approches non-exclusives, bien sûr, pour effectuer ces vérifications :

(i) La première consiste à définir une sémantique et une syntaxe rigoureuses pour la spécification formelle permettant d'effectuer une vérification en détectant tout problème inhérent à la spécification (Par. III-3). Ici, seule une **analyse des spécifications** est effectuée.

(ii) La seconde consiste à **vérifier que le développement s'effectue** correctement, bien que les spécifications soient correctes, en intégrant un processus de vérification au processus de construction du modèle final.

La technique consiste ici à assembler des sous-systèmes ou modules de base ayant de bonnes propriétés pour développer le modèle final qui se voit ainsi conférer certaines propriétés à travers la démarche de construction.

Tel est l'objectif principal des travaux concernant la définition des RdP structurés /COR80/ où chaque structure de base vérifie certaines propriétés comportementales (vivacité, finitude, absence de blocage ...) du fait de leur structure interne.

(iii) La troisième consiste à vérifier certaines propriétés, qui n'auraient pas pu être vérifiées par l'intermédiaire des deux premières, en **analysant le modèle final** à partir des spécifications.

Pour les RdP, par exemple, une analyse du comportement d'un graphe peut être effectuée de manière statique /BRA83/ /JEN87/, à partir de sa structure ou de manière dynamique par simulation.

Dans ce dernier cas, l'outil de simulation est dédié à la méthode de conception, car la structure du modèle développé et la nature exacte du formalisme utilisé (RdP colorés, RdP prédicats/transitions) sont des éléments principaux à la vérification de propriétés.

Et chaque méthodologie, ayant sa propre structuration, nécessite ainsi un simulateur spécialisé et intégré à la démarche de conception.

Cela justifie le développement de plusieurs simulateurs dans le cadre du projet CASPAIM (/CAS87/ pour CASPAIM 1 et /AUS92/ pour CASPAIM 2), puisque les graphes développés par l'une ou l'autre approche sont basés sur des principes de structuration différents.

#### **III-8-4- L'approche CASPAIM**

Il est à noter que ces différentes approches peuvent cohabiter en intégrant, par exemple, une composante expérimentale dès les premières phases de conception pour vérifier certaines propriétés qu'il est difficile d'analyser autrement.

Mais cela permet principalement, dans le contexte des systèmes de production, de valider rapidement certaines hypothèses de configuration. Ces hypothèses peuvent porter notamment sur le choix du nombre et du type d'organes opératifs, et de l'architecture correspondante, ou sur le dimensionnement correspondant au calcul (optimisation), ou au choix (sélection) des capacités.

Le but de cette validation est, en général, d'effectuer une présélection parmi un ensemble de solutions possibles et/ou une optimisation au préalable, dans le cadre d'une étude de faisabilité suivant des paramètres généraux.

Cette pré-étude permet ainsi une évaluation plus ou moins grossière d'une solution particulière basée sur des exigences en terme de coût financier et de performance ou suivant un compromis de ceux-ci.

L'approche CASPAIM est principalement basée sur la seconde approche bien que certaines études aient été consacrées à l'expérimentation très tôt dans le cycle de développement /HEI88/ /SEY89/ /OHL92/.

La conception préliminaire permet de développer l'architecture du système à concevoir à partir des besoins formulés en spécification (Quoi).

Ce développement nécessite une analyse rigoureuse et systématique de sorte à structurer et à organiser le système à partir des objectifs définis à travers les besoins. Il correspond au niveau organisationnel (Qui, Où et Quand) du cycle d'abstraction énoncé au paragraphe II-3-2.

En quelque sorte, partant de la spécification, exprimant uniquement le Quoi, cette analyse doit définir l'ensemble des opérations permettant d'atteindre ces objectifs et répondre aux questions suivantes :

- qui peut réaliser ces objectifs, c'est à dire quels sont les moyens dont nous disposons pour réaliser ces opérations (moyens opérationnels) et à quel endroit vont elles être réalisées (lieux opérationnels),

- à quel moment vont être réalisées ces opérations, mettant en évidence des problèmes relevant de la coordination (synchronisation, coopération).

### **III-9- Conclusion**

Dans le cadre du projet CASPAIM 2, une méthode systématique de spécification formelle et de conception préliminaire a été développée /AMA92a/.

A partir de la spécification des objectifs (gammes logiques), effectuée suivant une approche fonctionnelle, l'architecture du système de coordination est générée progressivement.

Cette génération est basée sur une analyse opérationnelle (gammes opératoires) intégrant progressivement des informations issues de la spécification de la partie procédé (organes opératifs et organisation fonctionnelle), effectuée suivant une approche de type fonctionnelle et relationnelle.

Notons enfin que l'aspect transitique joue un rôle essentiel dans cette analyse opérationnelle. En effet, pour dégager une ossature du système de coordination permettant une gestion et un contrôle optimal des flux de matière, il est nécessaire d'analyser l'organisation fonctionnelle du système de production préétablie ou à concevoir.

Cette analyse a pour but de mettre en évidence les différents moyens de production (robot, convoyeur, stockeur) intervenant dans un transfert de produit entre deux machines de fabrication (transport, manipulation et stockage) ainsi que leur organisation (relations d'accessibilité).

## CHAPITRE II

# DÉMARCHE DE SPÉCIFICATION ET DE CONCEPTION D'UN SYSTÈME DE COMMANDE

## Partie 1 : LE PROJET C.A.S.P.A.I.M. 1 - LIMITATIONS

### I- LE PROJET C.A.S.P.A.I.M.1 - LIMITATIONS

#### I-1- Représentation et modélisation

Le projet CASPAIM1 repose sur une représentation plus ou moins grossière du système de commande et basée sur une décomposition d'un système flexible de production en trois parties communicantes (figure II-1-1) : la partie procédé, la partie commande et la partie décisionnelle représentant le niveau hiérarchique ou stratégique.

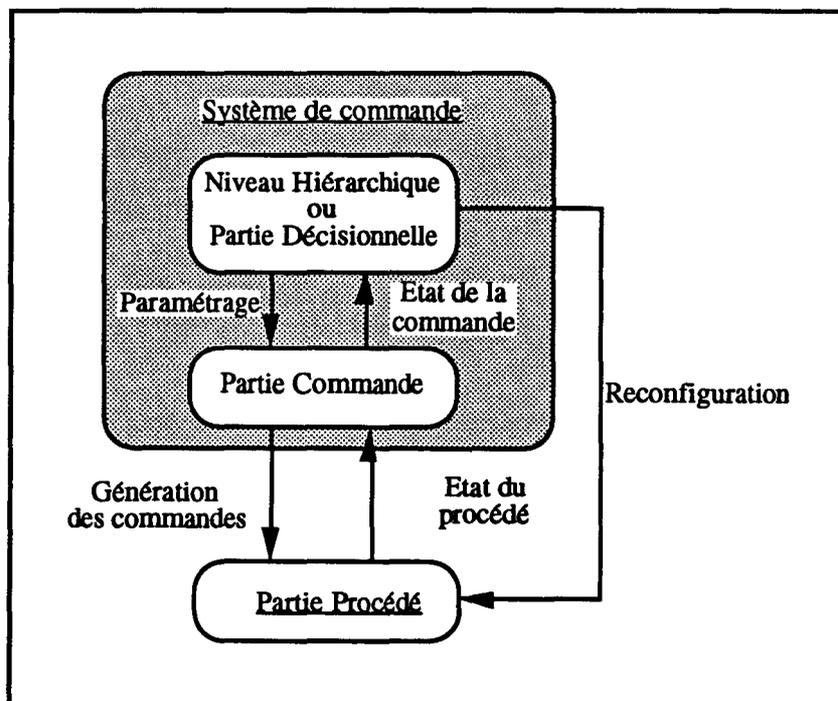


Figure II-1-1 : Décomposition d'un système de production dans CASPAIM1

- La partie procédé est constituée des différents actionneurs et opérateurs constituant l'ensemble des équipements matériels de production (fabrication, transport, manipulation) ainsi que l'ensemble des différents produits en cours de fabrication. Cette partie n'est modélisée que partiellement et uniquement au niveau du graphe de commande. D'une part, les produits sont représentés par l'intermédiaire des **jetons colorés** (type et état d'évolution). Et d'autre part, les équipements ne sont pris en compte que par l'intermédiaire d'une **temporisation des opérations** qu'ils réalisent et d'un **dimensionnement des zones de stockage**. La temporisation est effectuée au niveau des places représentant une opération à réaliser, par envoi d'une commande, et le dimensionnement s'effectue au niveau des places représentant les files d'attente.

- **La partie commande** a pour fonction d'appliquer l'ensemble des commandes aux différents équipements de production, pour réaliser les différents produits, en assurant leur séquençement (pilotage) et leur coopération (synchronisation et communication), et en fonction de l'état courant du procédé. Elle correspond donc au **système de coordination** décrit dans le paragraphe II-1-2. Le formalisme utilisé pour modéliser cette partie est basé sur les **RdP Structurés, Adaptatifs et Colorés**. Le caractère coloré permet de représenter les différents types de produits et l'aspect adaptatif permet l'interfaçage avec le niveau hiérarchique.

- **La partie décisionnelle** (niveau hiérarchique) a pour rôle l'élaboration d'un ensemble de décisions et de choix destinés à résoudre tous les points de concurrence tels que les conflits d'accès, issus du parallélisme, et les indéterminismes, issus de la flexibilité. Elle représente une partie du système de conduite décrite au paragraphe II-1-2. Cette partie est représentée par un **modèle déclaratif** de type système expert constitué d'un moteur d'inférence et de **règles décisionnelles**.

Ces deux dernières parties sont regroupées au sein d'une même partie représentant le système de commande (pilotage), dont le rôle principal est d'assurer la coordination des différentes commandes.

## **I-2- Démarche - Les différentes étapes**

### **I-2-1- Formalisation des besoins - Élaboration des gammes opératoires**

Cette phase consiste à élaborer, à partir du cahier des charges, une description formelle des gammes de fabrication simplifiées, dites ***gammes opératoires***, pour les différents types de produits à manufacturer.

Une première étape a été développée, visant à effectuer une description fonctionnelle du système par l'intermédiaire d'un outil de spécification des **gammes opératoires en langage semi-formel /GAS88/ /GAS89/**. L'objectif était alors de développer un premier modèle exécutable, dans le sens d'une approche de type prototypage rapide, pour effectuer une pré-étude en termes de faisabilité, de cohérence et de complétude d'une solution.

Plusieurs primitives de spécification ont été développées en langage PASCAL. Elles sont basées sur des concepts issus des langages de simulation (trajet de pièces, station, ressource...) et ont été regroupées en quatre classes de base : les mouvements de pièces, les opérations de type assemblage ou désassemblage et les primitives de gestion de ressources.

Dans une seconde étape, un travail de transformation de ces gammes opératoires, établies dans l'étape précédente, pour en obtenir une **représentation formelle** suivant un formalisme de type **règles de production** /KAR88/ /RAK88/. Cette étape sert de spécification initiale pour le développement graduel, phase suivante de conception, dans un contexte de prototypage lent, du graphe de commande final et complet.

Ces règles de production sont construites suivant le schéma suivant :

Prémisses => Conséquents

où Prémisses et Conséquents sont des conjonctions de prédicats de la forme :

Présence (objet, lieu)

### **I-2-2- Conception préliminaire - Analyse des gammes opératoires et génération d'un prégraphe**

A partir de l'ensemble des règles de production, une analyse de cohérence et de complétude est effectuée pour déterminer toute erreur de spécification. Cette analyse est basée sur un raisonnement de type IA par l'intermédiaire d'un moteur d'inférence fonctionnant en chaînage mixte (avant et arrière) /KAP87/.

Ensuite, à partir de ces règles vérifiées et validées, un modèle intermédiaire, appelé **prégraphe**, est généré. Ce modèle est une agrégation des règles sous forme de RdP coloré où :

- chaque place correspond à un lieu physique (lieu opératoire ou de stockage),
- une marque colorée représente un type d'objets ou de produits à manufacturer ainsi que son état d'avancement dans une gamme,
- et une transition modélise l'évolution que subit un produit, de type transformation physique (traitement) et/ou changement de lieu physique (transfert), et qui est traduite au niveau d'une règle de production /COR87/ /BOU87a/ /KAP88/.

Ce prégraphe représente ainsi l'ossature initiale ou l'architecture de base du système à partir duquel un modèle détaillé sera développé par l'intermédiaire de primitives pré-définies de structuration.

### **I-2-3- Conception détaillée - Primitives de structuration /BOU88a/**

A partir du prégraphe, chaque place est associée à un module de traitement et chaque transition à un module de transfert. Deux types de modules ou primitives de structuration de base ont été développées :

## - 1 - Les modules de traitement

La structure interne de ces modules est basée sur la représentation suivante :

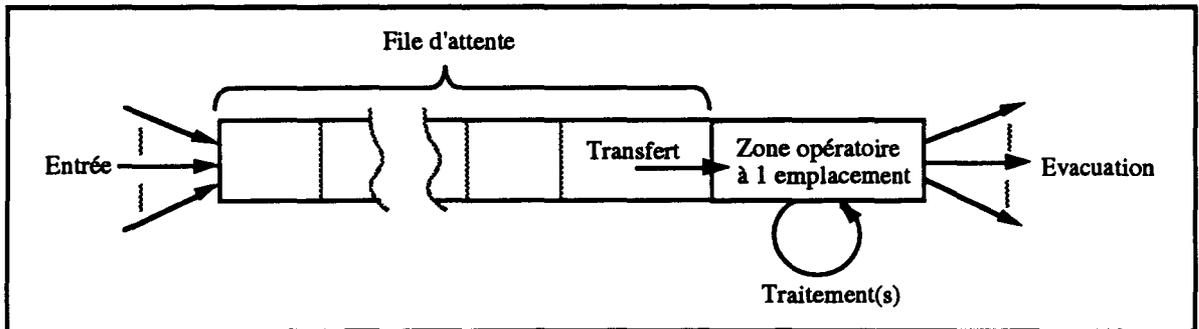


Figure II-1-2: Représentation symbolique d'un traitement

A partir de cette représentation, un module RdP (figure II-1-3) de base est construit de façon à représenter :

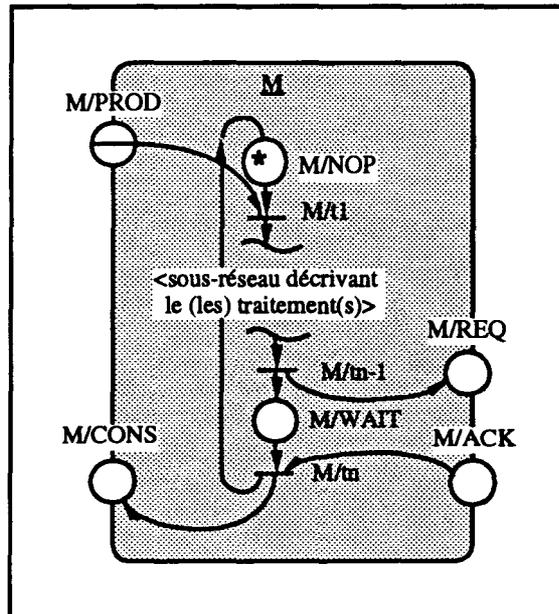


Figure II-1-3 : Structure interne d'un module de traitement

- la file d'attente par la liaison producteur/consommateur symbolisée par les places P/PROD et P/CONS,
- le transfert d'un objet depuis la file d'attente jusqu'à la zone opératoire ainsi que le traitement de cet objet, associé à cette zone, par un processus P,
- et l'évacuation par l'intermédiaire d'une liaison de synchronisation avec accusé de réception symbolisée par les places P/REQ et P/ACK.

A partir de ce module général de base, plusieurs sous types ont été développés pour représenter :

- les zones de stockages intermédiaires (sans traitement particulier),
- les machines constituées soit d'aucun tampon d'entrée/sortie, soit d'un ou plusieurs, soit d'un tampon d'entrée et d'un tampon de sortie séparément,
- les assemblages et désassemblages de type palettisation/dépalettisation,
- et les positionnements internes et externes à une machine.

## - 2 - Les modules de transfert

Un module de transfert (figure II-1-4) représente, d'une part, l'évacuation d'un objet (place TRSF/START) à partir d'un module de traitement. Ensuite, il représente l'entrée de cet objet (place TRSF/END) vers un autre module de traitement de manière synchronisée.

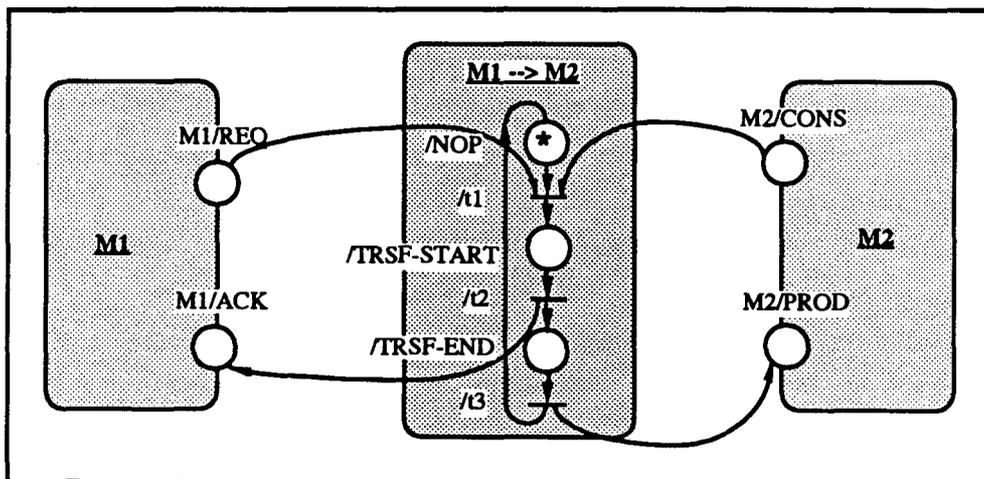


Figure II-1-4 : structure interne d'un module de transfert

### I-2-4- Validation par simulation /CAS87/

Une fois le graphe développé, une étude complète du comportement dynamique est effectuée. Pour cela, un simulateur a été développé qui prend en compte les trois modèles et qui permet d'effectuer une évaluation quantitative et qualitative.

C'est notamment à ce niveau que l'on effectue :

- le dimensionnement des zones de stockages,
- la temporisation des places correspondant à une action effective,
- et le choix d'une politique particulière d'entrée des produits permettant d'analyser le comportement (détection de blocage et de goulots d'étranglement).

Le choix d'une stratégie de pilotage par l'intermédiaire du niveau hiérarchique permet une évaluation qualitative.

### **I-2-5- Implantation /CRA89/**

A ce stade final, une répartition du système de pilotage (niveau hiérarchique et partie commande) est réalisée sur un ensemble d'organes de contrôle/commande (calculateur, API, CNC...) dont l'architecture matérielle est assujettie au choix d'un ou plusieurs types de réseaux de communication.

Le problème concerne ici, dans un premier temps, la traduction des modèles de conception en modèles implantables et, ensuite, le choix et la définition de critères de décomposition judicieux permettant d'obtenir une architecture de contrôle/commande optimale.

### **I-3- Principales limitations**

Les limitations du projet CASPAIM I proviennent essentiellement d'une caractérisation insuffisante du procédé, c'est à dire de la partie opérative et des produits.

En effet, une représentation fine du comportement de la partie opérative est quasiment impossible, puisque sa seule prise en compte est intégrée au graphe structuré et développé de la commande. Donc, les seules informations relatives à la partie opérative ne relèvent pas d'une description spécifique mais sont relatives à la représentation du modèle de la commande.

Plusieurs inconvénients en découlent :

- Les primitives de base de structuration, concernant les différents traitements (usinage, assemblage, stockage), ne présentent pas un haut niveau de généralité, car leur structure interne est obligatoirement pré-définie au préalable sans aucun degré de spécialisation en phase d'instanciation ou de génération. Elle doit dépendre ainsi de la structure du moyen de fabrication effectuant le ou les traitements en question.

Il devient alors assez difficile de représenter des caractéristiques inhérentes soit à des structures complexes telles que les systèmes de stockage à structure mobile (stockeur rotatif, ligne de transfert synchrone), soit à des zones opératoires communes à deux ou plusieurs opérateurs (robots de soudage), soit des assemblages sans contrainte d'antériorité.

- De même, en conception, un seul niveau d'abstraction est offert, d'où une représentation à un même niveau des transferts internes d'un moyen de transport (convoyeur), dont le nombre de modules dépend de la structure interne de ce moyen, et des transferts externes entre les différents moyens.

- Pour des raisons d'optimisation du système de pilotage et d'intégration de traitements liés à la surveillance, une représentation spécifique et détaillée de la partie opérative est obligatoire.

De même, la caractérisation des produits (typage et état d'avancement) est insuffisante et doit intégrer des informations supplémentaires telles que :

- la date due ou la priorité de certains produits pour évaluer une stratégie d'allocation ou d'ordonnancement temps réel,
- des références, ou liens logiques, entre produits pour une fabrication par lots nécessitant une identification individuelle des produits.

En conclusion, nous pouvons dire que les principales limitations proviennent, d'une part, d'une prise en compte en modélisation de manière agrégée, et donc non dissociée, de la partie logique et de la partie physique constituant l'aspect opérationnel d'un système de production (figure I-1-4).

La partie **logique** représente le système de **commande** (fonctions de gestion/contrôle) et la partie **physique**, ou opérative, représente les différents actionneurs et opérateurs (effecteurs, préhenseurs...) constituant chacun des **équipements** de production ainsi que l'architecture matérielle définie par l'**organisation** de ces équipements.

L'insuffisance de la méthode provient, d'autre part, d'une modélisation incomplète et diffuse de la partie opérative, qui est plus ou moins liée à la non-dissociation des aspects logique et physique, en phase de modélisation, pour laquelle la partie commande est privilégiée.

## Partie 2 : ÉVOLUTIONS - LE PROJET C.A.S.P.A.I.M.2

### II- ÉVOLUTIONS - LE PROJET C.A.S.P.A.I.M.2

#### II-1- Principales évolutions en conception

Les limitations énoncées dans la partie précédente ont mené l'équipe SED du LAIL à redéfinir globalement la méthodologie CASPAIM et notamment au niveau :

- de la démarche, basée principalement sur la **dissociation** de la partie **commande** et de la partie **opérative** concernant le système opérationnel (figure II-2-1), c'est à dire une spécification et une caractérisation de la partie logique, concernant **objectifs de production**, et de la partie matérielle, concernant les **moyens de production** (organes opératifs) ainsi que leur **organisation**, séparément et indépendamment l'une de l'autre,

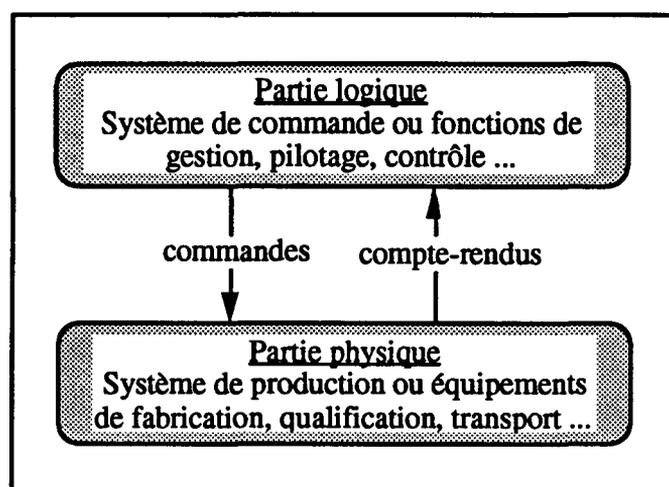


Figure II-2-1 : Représentation séparée de l'aspect opérationnel

- de la définition de nouveaux **concepts de modélisation** et en particulier des **primitives** génériques de **spécification**, pour modéliser la partie opérative, et de **structuration**, pour développer l'aspect logique et obtenir le système de commande suivant une approche graduelle de type prototypage lent,

- et de l'utilisation de formalismes de modélisation à haut niveau, tels que les **langages orientés objet** pour la partie opérative et les **RdP à Objets (RdPO)** pour la partie logique et son développement afin d'en obtenir le système de commande final.

Il est bien clair que ces évolutions vont permettre, comme décrit à travers les paragraphes précédents, d'intégrer différents aspects relatifs à la surveillance, la gestion des modes de marches, l'ordonnancement temps réel ...

## II-2- Principe de l'approche C.A.S.P.A.I.M. 2

D'après /ANA87/, pour appréhender efficacement un système automatisé de production dans sa globalité, il est nécessaire d'en effectuer une analyse suivant deux approches :

- approche par des **“objectifs produit”**,
- approche par des **“objectifs système”**.

Ces deux approches sont complémentaires et basées sur la dualité existante entre un système de production et le produit élaboré par celui-ci.

L'approche par des **“objectifs produit”** consiste à définir la **structure fonctionnelle du système de production**, en partant des caractéristiques du produit et des contraintes liées à l'organisation des opérations élémentaires (gammes de fabrication). Telle est l'approche qui a été décrite dans le paragraphe II-1-1. Elle est prépondérante pour le projet CASPAIM, puisque la démarche en conception concerne principalement le **système de coordination**.

L'approche par des **“objectifs système”** consiste à définir des modes d'exploitation, tels que les différents **modes de fonctionnement** normaux ou dégradés du système de production ainsi que les différentes **procédures** permettant le **passage d'un mode à un autre**. Cette approche permet ainsi de définir un système d'exploitation, c'est à dire l'organisation et la structuration du système de gestion technique d'un système de production dont l'organisation de sa commande a été définie suivant une approche **“produit”**.

L'approche **“produit”** permet donc de définir la partie inférieure du système de pilotage (coordination) et d'effectuer ainsi le lien avec les niveaux inférieurs (commande locale) du système global de gestion/contrôle (figure I-2-1). Alors que l'approche **“système”** permet de définir la partie supérieure du système de pilotage (conduite/supervision) et d'effectuer le lien avec les niveaux supérieurs du système de gestion/contrôle (ordonnancement, planification).

L'optimisation d'un système en fonction de sa finalité n'est possible qu'avec une approche **“produit”** alors que la maîtrise de l'évolution des objectifs en exploitation nécessite une approche **“système”** en conception suivant une vision globale et abstraite du système.

L'**approche système** est une approche **purement fonctionnelle**, c'est à dire une spécification fonctionnelle et une analyse descendante et hiérarchique par décomposition des fonctions de production en activités de plus en plus élémentaires (figure II-2-2).

Alors que l'**approche produit** est basée à la fois sur une approche fonctionnelle et surtout sur une **approche opérationnelle**.

Elle est basée sur une approche fonctionnelle dans le sens où on décrit le séquençement, correspondant à une organisation particulière, des différents traitements ou transformations fonctionnelles (liste de fonctions) à appliquer à chaque produit (gammes logiques). Cela revient à décrire fonctionnellement le processus de fabrication donc à effectuer une **spécification de type fonctionnelle** et non une approche purement fonctionnelle.

Elle est basée essentiellement sur une approche de type opérationnelle en analysant et en intégrant la structure, les caractéristiques et les contraintes liées aux différents moyens de production. Elle effectue ainsi une **analyse opérationnelle** qui consiste à établir des organisations de commande (gammes opérationnelles) de plus en plus complexes suivant une approche ascendante. Elle a pour point de départ les informations relatives à la caractérisation du procédé, c'est à dire les caractéristiques des différents produits et la structure de la partie opérative (figure II-2-2).

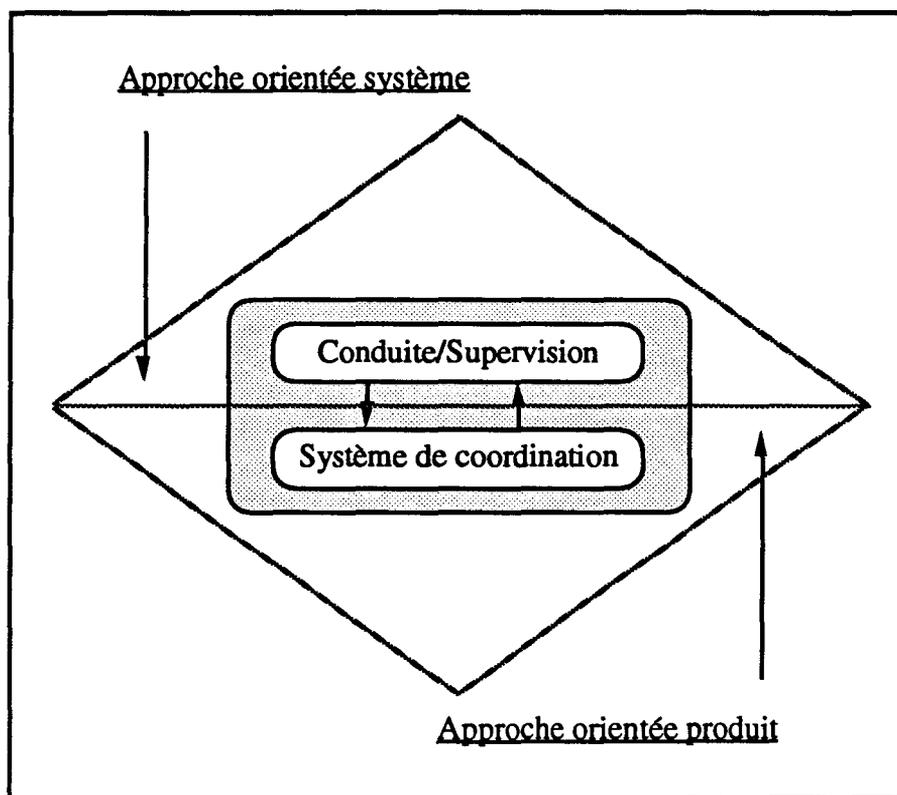


Figure II-2-2 : L'approche en analyse dans CASPAIM2

L'approche "système" a été exploitée dans CASPAIM2 pour définir une **organisation et une gestion des modes de marche /BOI91/**. Elle est basée sur une représentation structurelle du système de production sous forme d'arborescence.

Elle définit principalement un guide d'analyse d'un système en effectuant des regroupements de machines (machines virtuelles) dont les liens sont basés sur des interactions ou des dépendances d'état entre les différents organes sous forme de contraintes (coopération,

exclusion, observation...). Ensuite, un graphe d'état, basé sur le GEMMA /BOU87b/ (Guide d'Étude des Modes de Marche et d'Arrêt), est établi pour chaque machine physique. A partir de ces graphes et de l'arborescence établie par l'intermédiaire du guide d'analyse ou de la méthode de regroupement, une gestion globale des modes de fonctionnement est possible.

Des travaux en cours, qui ont débuté dans le cadre d'un DEA /KER92/, visent à intégrer dès la conception et, plus particulièrement en spécification, les différents modes de fonctionnement ainsi que leur gestion.

L'approche système essaie aussi de définir les liens avec le système de coordination en terme de réorganisation au niveau du graphe de commande et des ressources. Elle utilise SADT comme méthode d'analyse.

### **II-3- Définition des concepts /AMA92a/**

#### **II-3-1- Introduction**

Comme énoncé précédemment, l'approche orientée produit est prépondérante pour le projet CASPAIM2, car l'objectif en conception concerne principalement les niveaux bas de gestion/contrôle. Cette conception est relative à l'aspect opérationnel, c'est à dire le système de pilotage et les niveaux de commande inférieurs (contrôle local) et, de manière générale, l'architecture et interconnexion d'unités de contrôle locales (figure I-2-1). L'approche système, dont certaines études sont en cours, permettra à plus ou moins long terme d'intégrer les niveaux supérieurs de gestion/contrôle (ordonnancement, gestion des modes de fonctionnement...).

Certains concepts ont été définis permettant de caractériser et d'appréhender au mieux cet aspect opérationnel, constitué de la partie logique (objectifs de production) et la partie physique (moyens de production et organisation) ou procédé (figure II-2-1).

#### **II-3-2- La partie logique**

##### **II-3-2-1- Les gammes logiques /CRU91/**

La conception d'un système de pilotage/coordination par une approche orientée produit ou plutôt, flux de produits, s'effectue à partir d'objectifs formulés à travers certaines caractéristiques des produits à fabriquer. Ces caractéristiques expriment les différentes opérations à réaliser sur chacun d'entre eux. Aucune hypothèse n'est faite, a priori, sur la nature des organes opératifs utilisés pour réaliser ces objectifs.

Chaque type de produit définit, alors, un objectif particulier du système qui est représenté sous forme d'une **gamme "logique"** que l'on peut définir à partir d'opérations dites caractéristiques :

*Une opération est dite caractéristique si elle représente une transformation fonctionnelle (usinage, assemblage, conditionnement, contrôle...), c'est à dire si elle n'a pas comme objectif un transfert et/ou un stockage uniquement.*

*La gamme logique d'un produit décrit le séquençement (contraintes d'ordre) des opérations élémentaires et caractéristiques définissant ainsi le processus de fabrication qui permet d'obtenir le produit fini à partir de son état brut.*

Une gamme logique correspond ainsi à une **description purement fonctionnelle du processus de fabrication**, sans aucune référence, d'une part, au procédé technique utilisé pour réaliser une opération caractéristique, et d'autre part, à l'aspect physique ou matériel du système de fabrication.

L'élaboration ou l'obtention de ces différentes gammes logiques nécessite une caractérisation et une analyse du produit. Cette analyse porte sur la définition du processus logique de fabrication suivant le respect de certaines contraintes telles que des règles d'antériorité ou de précédence pour l'obtention de ces processus logiques dans le domaine d'assemblage.

Notons, à ce sujet, que de nombreux travaux ont été effectués et sont complémentaires à ceux du LAIL dans le sens où tous ou, une partie de, ces travaux se situent en amont de ceux-ci. Ces travaux concernent, d'une part, le laboratoire LAB à Besançon /BOU84/ /BOU87c/ /BOU90a/ /BOU90b/ /BOU90c/ /CAM89/ /HEN90/ pour l'assemblage et, d'autre part, le laboratoire de Génie Automatique de l'ISMCM à Saint-Ouen /ANA87/ pour l'usinage.

### **II-3-2-2- Les gammes opératoires /CRU91/**

Une définition matérielle du système de production, ensemble des organes opératifs, permet de décrire, dans un premier temps, les différents moyens de fabrication sur lesquels vont s'effectuer ces transformations fonctionnelles (aspect fonctionnel). Ensuite, une description des autres moyens concernant le transport, la manipulation et le stockage, suivie d'une énumération des différents transferts, ou échanges possibles de produit (pièce) entre ces différents moyens (liens d'accès), sont réalisées pour intégrer l'aspect *transitique*.

Cet aspect transitique définit l'organisation choisie pour le système de fabrication et relative au système de transport à travers une description du routage des différents produits au sein du système de production.

L'élaboration des gammes opératoires représente alors l'adéquation issue d'une analyse et d'une synthèse opérationnelle qui sont effectuées à partir de la définition logique (gammes logiques) et de la définition physique (moyens de production et organisation). Chacune des gammes opératoires peut alors se définir ainsi /AMA92a/ :

*La gamme opératoire d'un produit décrit le séquençage des différentes transformations, fonctionnelles et positionnelles, faisant ainsi apparaître la succession des lieux physiques sur lesquels il transite.*

Une gamme opératoire représente donc une fusion entre une 'gamme d'usinage' (gamme logique) représentant l'aspect fonctionnel du système de fabrication (transformations fonctionnelles) et une 'gamme de transport' représentant l'aspect transitique du système de production (transformations positionnelles).

Chaque gamme opératoire représente ainsi l'enchaînement et l'ordre d'exécution des différentes transformations ou opérations que devra subir une classe de produits caractérisée par la gamme, lors de sa fabrication. Ces opérations peuvent être de deux types différents :

**-1- Les transformations fonctionnelles** : elles correspondent à un traitement particulier effectué sur une zone opératoire et sur un produit pour lequel il en résulte une modification caractéristique (opération caractéristique) de son état. Pendant la durée du traitement le produit doit être solidaire de la zone opératoire qui, associée à un opérateur quelconque (outils de transformation), constitue une ressource de fabrication.

Cette modification caractéristique correspond à l'élaboration d'un procédé technique particulier sur un produit dont le but est de lui apporter une certaine valeur ajoutée. Elle est obtenue soit en lui donnant de la forme (usinage) par changement de l'état physique (propriétés extrinsèques), soit en le conditionnant (propriétés intrinsèques), soit en le rendant solidaire physiquement d'un autre produit (assemblage), soit en contrôlant son état (contrôle de conformité), nécessitant une certaine durée opératoire et induisant, de ce fait, une certaine valeur ajoutée.

**-2- Les transformations positionnelles** : elles correspondent à un transfert particulier d'un produit d'une zone opératoire (machine de fabrication) vers une autre adjacente au niveau de la gamme. Elles représentent ainsi les différents changements de lieux opératoires permettant l'exécution effective des transformations fonctionnelles sur ces différents lieux opératoires.

Cet enchaînement de transformations met ainsi en évidence l'ordre de passage de chaque produit sur les différentes ressources de production (fabrication, transport, manipulation, stockage) ou sur les différents lieux physiques (zones opératoires, lieux de transfert et/ou de stockage). Ceci est obtenu par la **mise en évidence, pour chaque transfert** (changement de lieu opératoire), des différentes **ressources de transport** (convoyeur), de **manipulation** (robot) et de **stockage** (stock statique, stock rotatif ...) intervenant au niveau du transfert.

De ce fait, sont représentés les différents lieux physiques sur lesquels une **opération de type transformation ou neutre**, vis à vis de l'état (positionnel ou fonctionnel) du produit et en fonction de la nature du lieu. La nature d'un lieu est relatif à la fonction à laquelle il a été dédié (lieu de travail, de stockage, de préhension ...).

Parmi les lieux où un produit pourra subir une opération de transformation, nous avons :

- les différents lieux destinés à maintenir un produit en vue d'un traitement (transformation fonctionnelle) correspondant aux **zones opératoires** pouvant être **statiques** ou **mobiles**,

- les différents lieux destinés à supporter un produit en vue d'un mouvement (déplacement et positionnement) particulier pour le transférer (transformation positionnelle) vers un autre support correspondant à des **lieux physiques** pouvant être **mobiles** (préhenseur) et/ou **actifs** (canton de convoyage),

- les différents lieux destinés à stocker temporairement un produit et dotés d'un certain mouvement (transformation positionnelle) ou d'une structure à évolution dynamique (carrousels, stockeur rotatif ...) correspondant à des **lieux mobiles**.

Enfin, parmi les lieux sur lesquels un produit peut subir une opération neutre vis à vis de son état (fonctionnel et positionnel), nous avons les **lieux purement statiques** (stocks tampons) dont le rôle est de stocker uniquement et temporairement des produits.

En résumé nous pouvons dire qu'un **transfert** représente un **changement de lieu opératoire** et qu'un **échange** de produit, entre deux ressources de production, représente un **changement de lieu physique** quelconque (figure II-2-3).

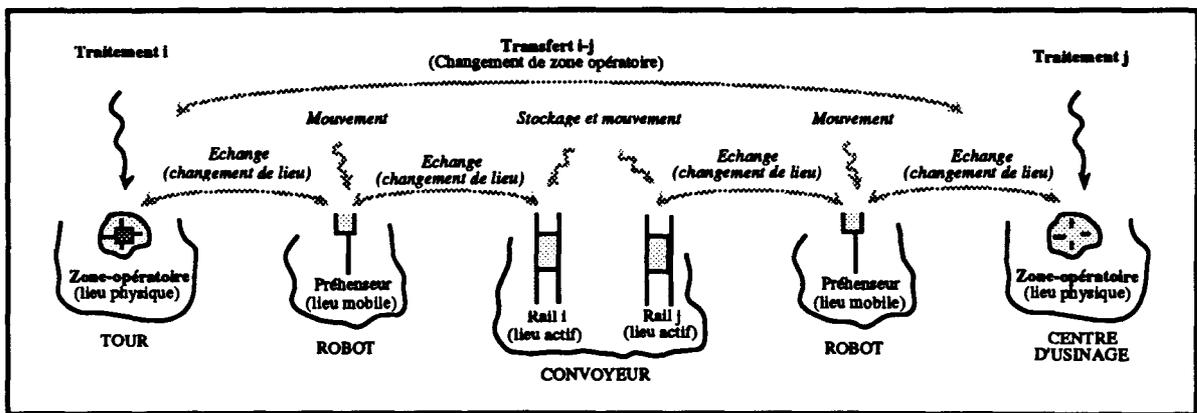


Figure II-2-3 : Transfert entre deux zones opératoires

### II-3-2-3- Les gammes opératoires étendues

Les gammes opératoires définies dans le paragraphe précédent expriment uniquement le séquençage des différentes opérations nécessaires à la réalisation d'un type de produit sous forme d'une succession de lieux physiques et de changement de lieux (figure II-2-3).

Chaque gamme met ainsi en évidence une représentation statique du suivi de chaque type de produit.

Ensuite, la réalisation effective et dynamique d'une gamme opératoire, indépendamment des autres, va nécessiter certaines informations relatives au problème de coopération des ressources lors d'un changement de lieu d'un produit (échange de produits) et de configuration des ressources pour l'exécution (choix et lancement) d'une opération sur un lieu donné.

De même, la réalisation dynamique d'une gamme donnée (flux de produit) et des différentes gammes simultanément (parallélisme de flux) va nécessiter des informations relatives à la concurrence et au partage des ressources (protocole d'accès et stratégie d'allocation).

Ces différentes informations, inhérentes au problème de coordination, doivent apparaître au sein des gammes opératoires (gammes opératoires étendues). Elles sont de trois types qui peuvent s'énoncer de la manière suivante :

-1- Les problèmes de coordination propres à une gamme donnée et à un produit donné, relevant de la coopération (communication et synchronisation) des ressources pour réaliser un échange de produit. En effet, le comportement de chaque ressource, vis à vis du chargement et du déchargement d'un produit, diffère d'une ressource à

une autre, ce qui induit des modalités d'échange de produit très différentes en fonction des ressources intervenantes pour un échange donné.

Cela nécessite la définition de scripts ou de comportements d'interconnexion ou de coopération entre ressources spécifiques à un échange.

Par exemple, un échange de pièce (chargement ou déchargement) entre un robot et une machine aura un comportement différent selon que la machine représente un tour horizontal ou un centre d'usinage. En effet, dans le cas du chargement d'une pièce sur le centre d'usinage par le robot, le robot peut lâcher la pièce, donc desserrer la pince, avant son serrage dans le montage d'usinage du centre. Alors qu'avec le tour, la même opération impose l'inverse.

De même, pour un même échange, on peut observer quelques différences selon que cet échange consiste soit à un chargement soit à un déchargement d'une machine d'usinage puisque la morphologie de la pièce se voit transformée entre l'instant de chargement et l'instant de déchargement /MOR90b/.

Ces différentes modalités de coopération (communication et synchronisation) de ressources propre à un échange de produit et à une gamme donnée doivent être représentées au sein des gammes opératoires.

**-2- Les problèmes de coordination propres à une gamme donnée et à un produit donné relevant de la configuration des ressources pour l'exécution d'une opération.** En effet, l'évolution du produit au sein d'une gamme opératoire marque le passage sur différents lieux physiques parmi lesquels certaines opérations actives vis à vis du produit (traitement et mouvement), devront être effectuées (figure II-2-3).

Cela se traduit par la sélection et la demande d'exécution d'une opération particulière en fonction du produit considéré correspondant :

- soit au chargement et à l'exécution d'un 'programme-pièce' spécifique au produit en question, et représentant un traitement à réaliser sur une MOCN (tour, centre d'usinage ...),
- soit au chargement et à l'exécution d'un programme de transfert de produit représentant un mouvement (trajet) à effectuer par un robot.

Ces différents programmes, ou processus, sont conçus indépendamment et préalablement par l'intermédiaire d'outils de type CFAO pour les traitements, et de type CAO-Robotique pour les mouvements.

Le rôle du système de coordination consiste à lancer l'exécution des différentes opérations (protocole DNC2), constituant une gamme donnée, en téléchargeant (protocole DNC1) les programmes correspondants au moment voulu.

**-3- Les problèmes de coordination propres à l'exécution simultanée de plusieurs produits pour une gamme donnée (flux de produit) et de plusieurs gammes opératoires (parallélisme de flux).**

Ces problèmes relèvent de la **concurrence** concernant les conflits d'allocation et d'accès à des ressources communes dus au nombre limité (contrainte de disponibilité) ou à la capacité limitée (contrainte de capacité) des ressources et au nombre d'accès simultanés à un lieu (contrainte d'accès simultané). Pour cela, il faut définir des protocoles d'allocation qui vont permettre de mettre en oeuvre des mécanismes de résolution.

Un protocole d'allocation d'une ressource exprime une demande d'acquisition d'une ressource, l'autorisation d'acquisition et l'acquisition effective de cette ressource et ensuite sa libération. La réponse à une demande d'allocation (autorisation ou non) dépend de certaines conditions portant sur l'état courant. Cet état courant est relatif à la nature et au caractère de la ressource à acquérir.

Il porte, notamment, sur l'occupation, faisant référence à la disponibilité d'une ressource sur laquelle une opération de transformation (traitement ou mouvement) sera effectuée. Cet état peut, également, porter sur la capacité, faisant référence à la disponibilité en nombre de places, et sur le nombre d'accès simultanés pour un lieu de stockage.

Il faut donc mettre en évidence les **mécanismes représentant**, d'une part, l'état (disponibilité, dimensionnement de la capacité et du nombre d'accès simultanés) **d'une ressource**, ainsi que l'évolution de cet état, et exprimant, d'autre part, les **protocoles d'accès** (demande et réponse d'allocation, acquisition et libération) et les **stratégies d'allocation** permettant par exemple la réalisation ou non d'opérations en temps masqué.

#### **II-3-2-4- Les gammes de Transfert des Ressources Libres (TRL) /GAS89/**

Les gammes opératoires décrivent de manière satisfaisante le trajet des produits. Cependant, certaines **ressources** de la partie procédé sont **passives**, c'est à dire démunies de tout système d'actionnement, et **mobiles** dans le sens où elles sont véhiculées au sein du système de production.

Ce type de ressources concerne l'outillage ou l'équipement représentant, non pas les outils de manipulation (préhenseur) ou du procédé (effecteurs), mais les **supports de pièce**.

Parmi ces ressources nous avons, dans un premier temps, les plateaux ou les platines d'usinage nécessitant une opération de bridage pour le maintien du produit sur ces derniers. Ensuite, nous avons les supports de transfert d'un produit, tels que les palettes de convoyeur.

Ces supports de pièces ont un rôle d'**interface** et permettent d'**adapter les produits aux ressources de production** pour des raisons soit de maintien au niveau d'un lieu physique en vue d'un traitement et/ou soit de transport en vue d'un transfert entre différents lieux.

Ces ressources passives font partie effectivement du système de production, en tant que **constituant**, mais ne sont pas solidaires physiquement d'une **ressource de production** à proprement parler.

Elles deviennent ainsi des éléments significatifs et nécessitent de ce fait, au même titre que les produits, un suivi particulier se traduisant par une gestion de leurs différents mouvements, en cours d'exploitation, qui relève du système de coordination.

Chacune de ces ressources de type support, destinée à être affectée à un moment donné en cours d'exploitation à un produit, est au départ '**libre**' de toute affectation, c'est à dire non requise et non allouée à un produit.

Ensuite, elle est allouée et puis enfin libérée pour suivre un trajet bien particulier au sein de la ressource de production, à laquelle elle appartient, en vue d'être recyclée pour une prochaine affectation.

La gestion de ces supports consiste, alors, en un suivi sous forme d'une description des différents transferts lorsqu'elles sont libres, puisqu'en cours d'affectation cette description est commune à la gamme opératoire du produit en question.

Ensuite, elle doit exprimer la synchronisation entre un produit et une ressource libre exprimant la rencontre en cours d'affectation et de chargement.

C'est ainsi que le suivi des ressources libres de type support doit être explicitement décrit au sein d'une gamme spécifique dite TRL.

### **II-3-2-5- Les gammes de Transfert par Lots (TL)**

Bien souvent, le transport des produits au sein d'un atelier ne se fait pas individuellement mais sous forme de lot par l'intermédiaire de plateaux, palettes et autres supports multi-produits, pour des raisons d'efficacité et de coût.

Bien que ces lots soient considérés comme des supports de produit, tout comme les support à capacité unitaire concernant les gammes TRL, leur gestion est complètement différente puisqu'ils n'ont pas la même fonction.

Les **supports unitaires** ont un rôle d'interface pour **adapter** les produits aux ressources de production. Leur gestion au sein du modèle interne à un module de transfert (gamme de transfert interne) s'effectue par agrégation, au même titre qu'un assemblage, puis par désagrégation, au même titre qu'un désassemblage.

Les **lots** ont un rôle de **support de transport "groupé"** pour transférer **plusieurs produits** à la fois. Leur gestion est beaucoup plus délicate à représenter au sein des gammes.

Un gestion spécifique est donc nécessaire et, de ce fait, une représentation des différents trajets empruntés par ces entités au sein d'un atelier. Chaque trajet doit être représenté explicitement par une **gamme de transfert**.

Donc, au même titre que les produits, chaque type de lot sera représenté par une gamme particulière, où chaque place représentera un lieu physique de transit, et chaque transition un transfert entre deux lieux de transit.

### **II-3-3- La partie physique**

#### **II-3-3-1- Introduction**

Comme énoncé au paragraphe II-2-2-2, l'élaboration des gammes opératoires est effectuée progressivement suivant une analyse et une synthèse opérationnelle de la partie physique. Cette analyse permet de mettre en évidence les différents lieux physiques intervenant dans le cadre d'un échange de produit et nécessitant ainsi une gestion significative de la coordination. Elle permet notamment de mettre en évidence les points de coopération, de configuration et de partage de ressources (Par. II-2-2-3).

Une représentation adéquate de la partie physique est donc nécessaire pour l'intégrer convenablement au sein du modèle de coordination représenté par l'ensemble des gammes opératoires interconnectées. De ce fait, la description des différents moyens de production (machines de fabrication, système de manipulation et de transport, et système de stockage) est basée sur des notions bien définies permettant de dématérialiser la partie physique et d'obtenir ainsi un **modèle orienté commande de manière systématique**.

Cette dématérialisation permet d'appréhender le système physique de production suivant une vision privilégiant, non pas les ressources physiques comme principaux acteurs, mais, les différents lieux physiques (ressources de base) les constituant et intervenant dans un échange de produit (figure II-2-3).

Ce modèle orienté commande de la partie physique est basé principalement sur les notions de relation d'accessibilité et de lieu caractéristique (directe et indirecte).

#### **II-3-3-2- Relation d'accessibilité**

La notion de relation d'accessibilité définit les liens existants entre différents moyens de production concernant les échanges de pièces.

*Un moyen (machine d'usinage) est en relation directe (accessibilité directe) avec un autre (robot) si un produit quelconque peut transiter de l'un à l'autre sans passer par un moyen physique intermédiaire (chargement et déchargement de la machine par le robot). Les relations d'accessibilité indirectes se déduisent automatiquement par transitivité.*

Ces relations traduisent une définition préalable de l'architecture fonctionnelle du système physique de production (organisation des différents moyens de production). Elles expriment, aussi, la nature des flux de produits, véhiculés entre les différents moyens de production.

### **II-3-3-3- Lieu caractéristique**

La notion de lieu caractéristique définit, tout d'abord, un lieu physique (emplacement de travail, de transport ou de stockage), mobile ou non, pouvant recevoir un produit.

*Un lieu physique est dit caractéristique s'il constitue un lieu de travail (transformation fonctionnelle), ou s'il est en relation d'accessibilité externe, c'est à dire avec un lieu physique d'un autre moyen de production.*

Un lieu caractéristique est donc un lieu physique appartenant à un moyen de production et représentant soit une zone opératoire, soit une zone d'accès à ce moyen.

Ces deux notions permettent de prendre en compte progressivement des moyens, ou ressources, de production plus ou moins complexes (stockeur à structure rotative et accès multiples) où la commande est souvent élémentaire tout en nécessitant une gestion assez sophistiquée.

### **II-3-3-4- Ressource complexe**

*Une ressource est dite complexe si elle comporte soit plusieurs lieux caractéristiques, soit au moins un lieu non caractéristique. Elle est dite élémentaire dans les autres cas.*

Pour ce type de ressource, seuls les lieux dits caractéristiques seront représentés dans une première phase (gestion au niveau atelier). Dans un second temps (gestion au niveau ressource), un **modèle interne de type comportemental** à ces ressources est développé pour mettre en évidence les lieux non caractéristiques (relations d'accessibilité interne). Ce

mode de représentation permet une **description réursive** et très fine du suivi des produits et, de ce fait, une meilleure représentation des flux en vue de leur gestion.

En effet, le schéma conceptuel de gestion/contrôle (figure II-2-6), qui sera défini par la suite, pour la coordination au niveau des ressources reste valable à part entière et est appliqué tel quel pour la gestion d'une ressource complexe au niveau des lieux internes.

### II-3-3-5- Lieu caractéristique virtuel

Ainsi, un lieu caractéristique d'un moyen définit soit un lieu de travail, soit un lieu d'accès à ce moyen. Cependant, certaines ressources représentent à la fois des lieux, ou emplacements de produits, **devant être accessibles** pour le chargement ou le déchargement, et des **supports** dotés d'une certaine **mobilité**. Tel est le cas des chariots automoteurs qui effectuent des déplacements au sein de l'atelier ou d'un stockeur rotatif dont la structure (ensemble des lieux caractéristiques) évolue dynamiquement.

Dans la philosophie CASPAIM, un lieu d'accès à une ressource désigne, non pas nécessairement le lieu physique de cette ressource devant supporter un produit, mais plutôt la zone d'accès à partir de laquelle la ressource accédante devra se positionner pour effectuer un échange de produit.

De ce fait, pour représenter ce type de ressource, il est nécessaire de définir certaines notions complémentaires.

*Un lieu est dit 'accédé', respectivement 'accédant', si il se comporte de manière passive (lieu de travail, de stockage ...), respectivement active (préhenseur), vis à vis de son chargement et déchargement de pièces .*

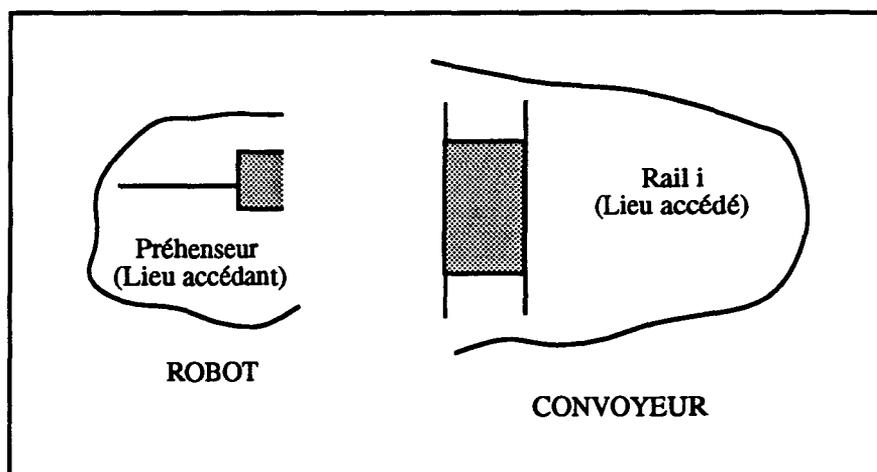


Figure II-2-4 : Lieu accédant et lieu accédé

*Un lieu caractéristique virtuel est une zone d'accès statique faisant référence à un lieu caractéristique physique qui est à la fois accédé et mobile.*

**Un lieu virtuel peut faire référence à plusieurs lieux physiques mobiles différents (chariots automoteurs).**

La figure II-2-5 permet d'illustrer ces propos sur deux exemples concernant un circuit de transfert de chariots automoteurs avec plusieurs dérivations (chargement et déchargement), et un stockeur rotatif constitué de plusieurs étagères.

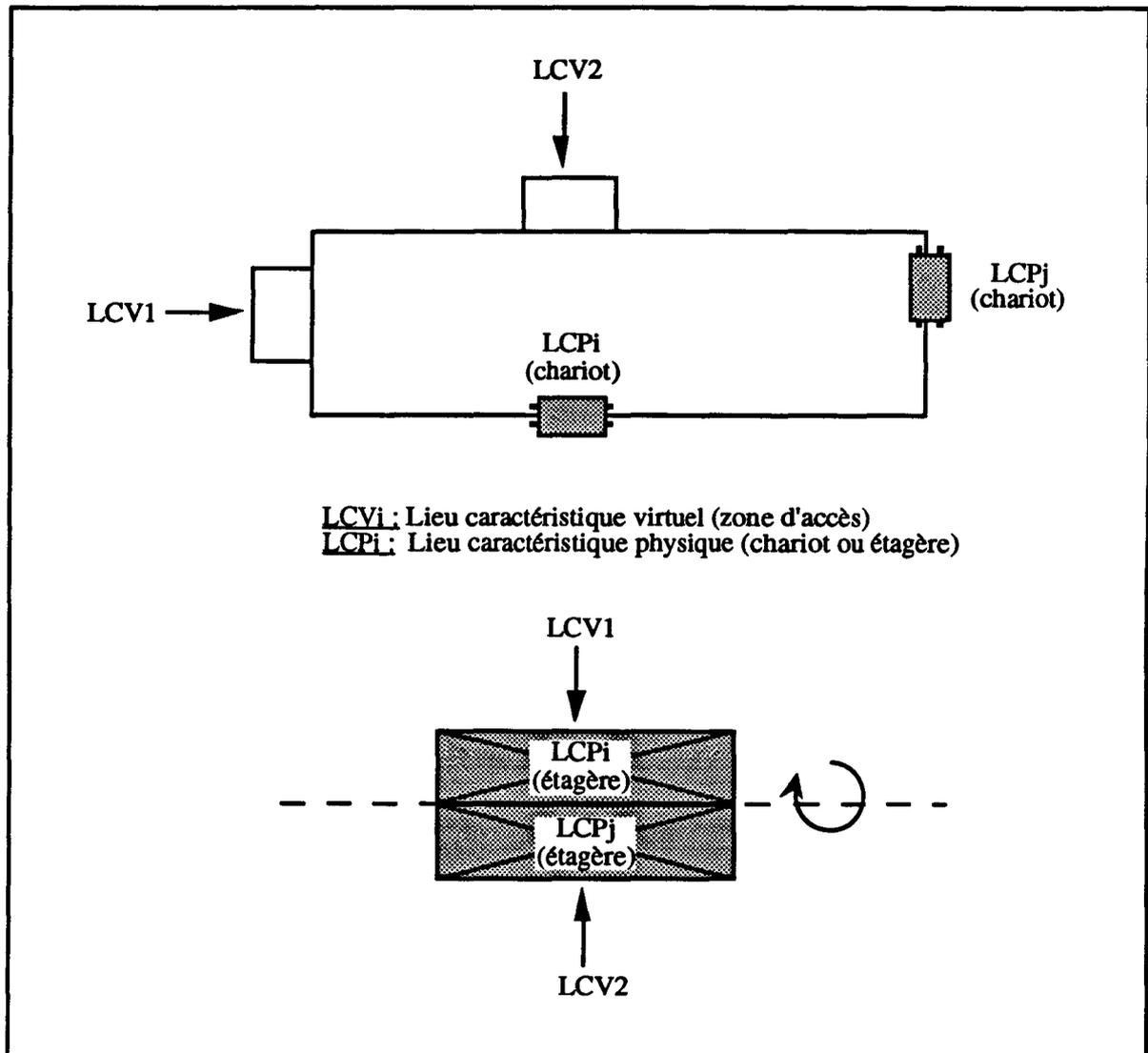


Figure II-2-5 : Lieux caractéristiques virtuels

#### II-4- Schéma conceptuel du système de pilotage

A partir des différentes notions définies au préalable, nous aboutissons à un schéma conceptuel (figure II-2-6) relatif à la représentation hiérarchique du système de pilotage et, en particulier, de coordination, dont l'organisation a été présentée au chapitre I (Par. II-2).

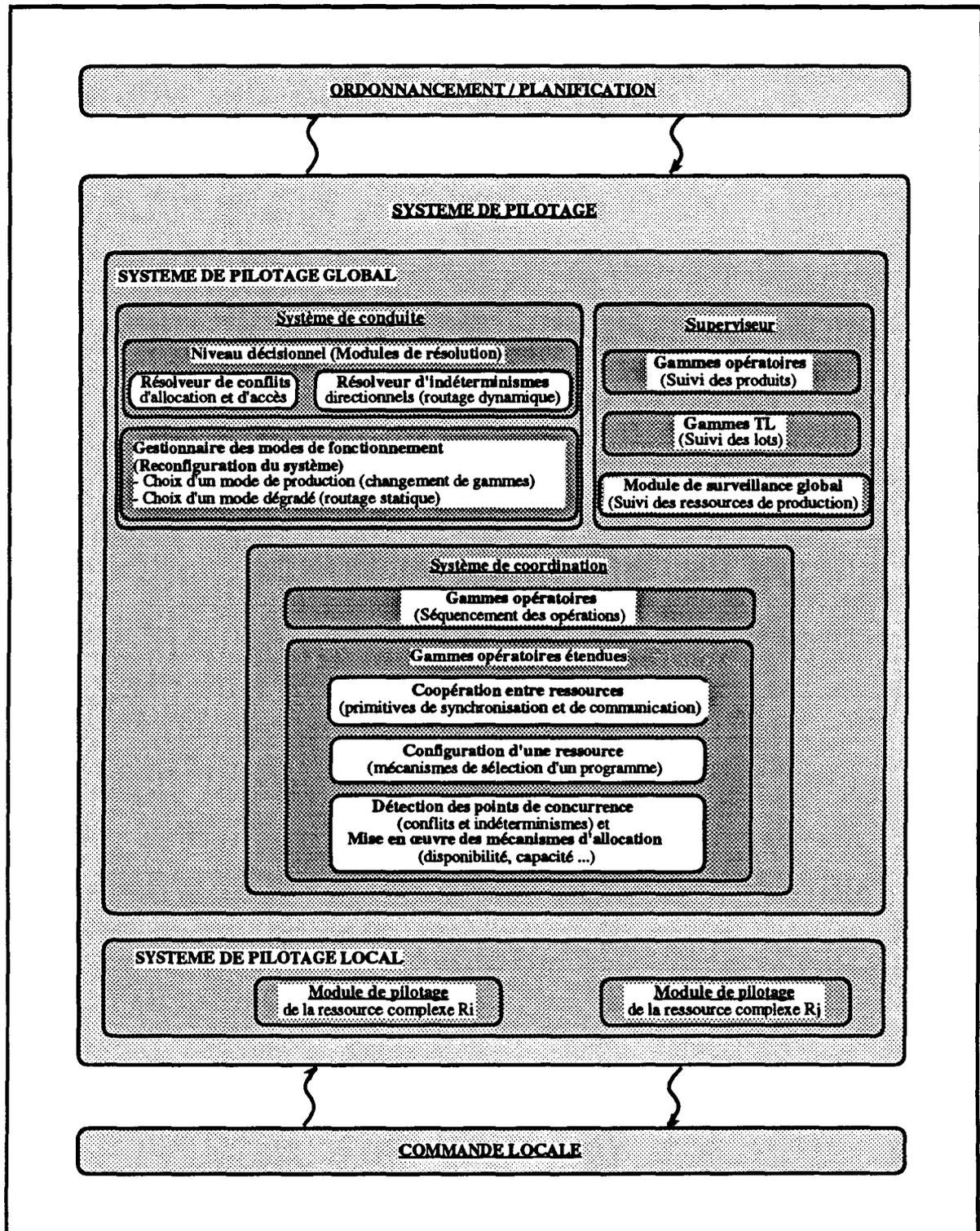


Figure II-2-6 : Schéma conceptuel du système de pilotage

Par récursivité, chaque module de pilotage et de gestion d'une ressource complexe aura une organisation interne similaire au schéma conceptuel du système de pilotage global.

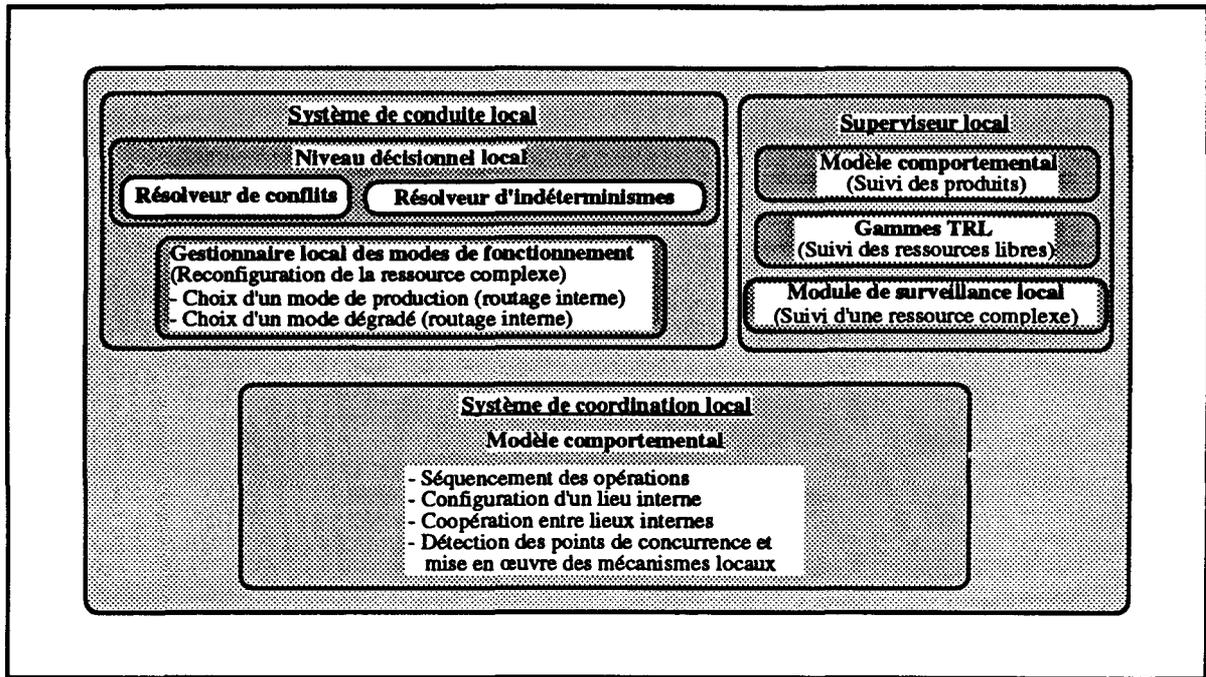


Figure II-2-7 : Module de pilotage et de gestion d'une ressource complexe

## II-5- Les étapes de conception

### II-5-1- Démarche de conception

La démarche de conception est synthétisée sur la figure II-2-8.

### II-5-2- Phase de spécification

#### II-5-2-1- Spécification de la partie logique et physique

/AMA90/ /CRU91/

Dans cette étape, nous effectuons une **description formelle** de l'aspect purement opérationnel d'un système de production à partir de la spécification de la partie logique et de la partie physique.

Concernant la partie logique, une spécification des différentes gammes logiques, intégrant la flexibilité relative à l'ordre d'exécution des opérations caractéristiques, est effectuée /CRU91/.

Et, en ce qui concerne la partie physique, la spécification porte sur l'ensemble des moyens de production ainsi que sur leurs contraintes de fonctionnement et sur l'architecture fonctionnelle relative à une organisation particulière de ces moyens (relations d'accessibilité) /AMA90/.

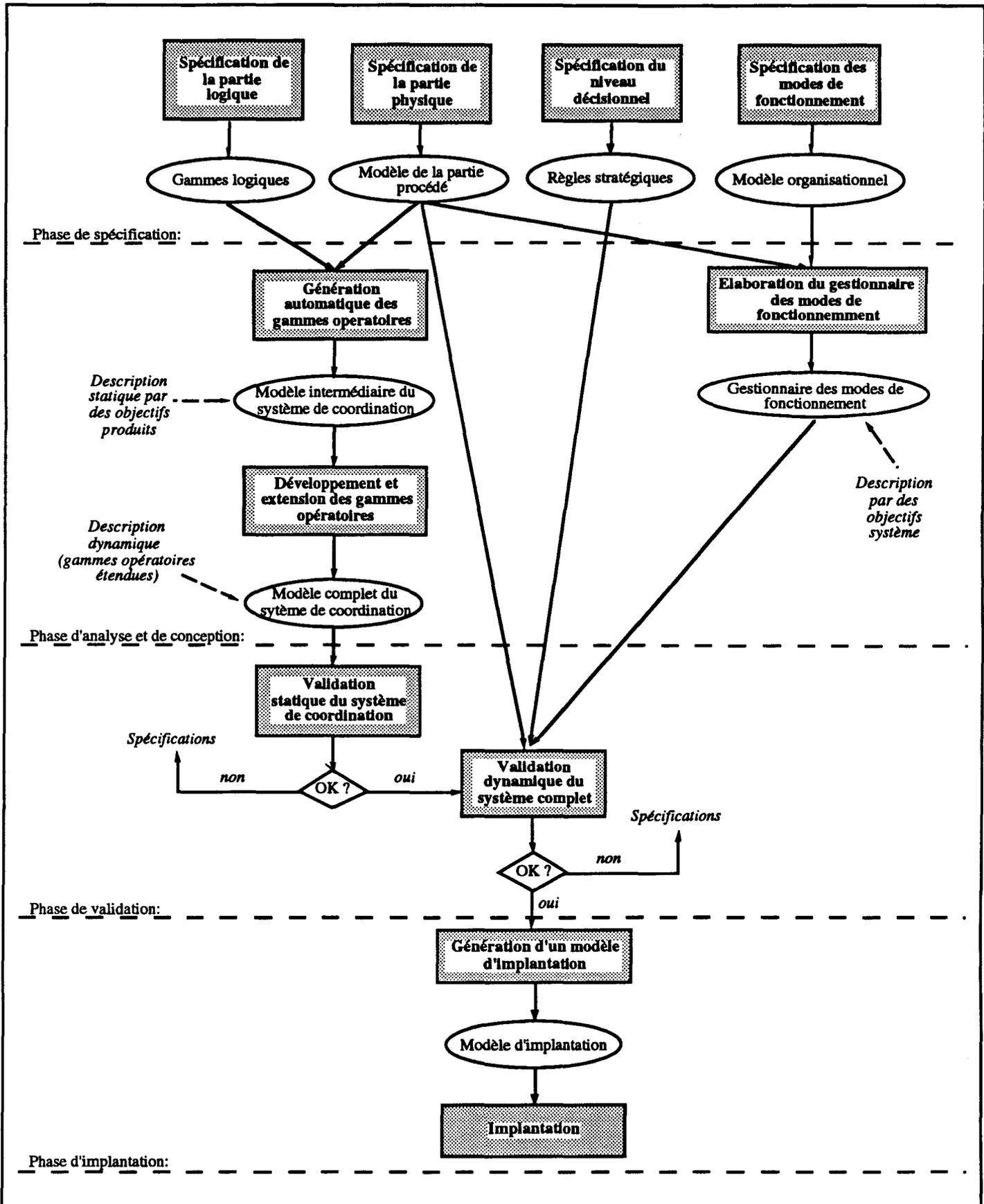


Figure II-2-8 : Démarche de conception

Cette spécification permettra de générer une description du système de gestion/contrôle suivant des objectifs ou une approche orientée produit (figure II-2-2).

#### **II-5-2-2- Spécification de la partie décisionnelle /TAW92/**

Cette étape consiste à élaborer et à décrire des stratégies de pilotage du système sous forme de règles décisionnelles permettant de conférer au système un **comportement autonome**, par résolution des différents conflits, et **déterministe**, par résolution des différents problèmes inhérents à l'ordonnancement temps réel et notamment au routage des produits relatif à la flexibilité du système de transport.

#### **II-5-2-3- Spécification des modes de fonctionnement /KER92/ /KER93/**

Comme énoncé au paragraphe II-2, la description des modes de fonctionnement utilise une spécification de type fonctionnelle. Elle vise à décrire des organisations relatives aux différentes gammes et aux différentes ressources de production et correspondant aux différentes reconfigurations à effectuer pour passer d'un mode de fonctionnement à un autre.

Elle permettra d'aboutir à une description du système de gestion/contrôle suivant une approche orientée système (figure II-2-2).

### **II-5-3- Phase d'analyse et de conception**

#### **II-5-3-1- Élaboration du gestionnaire des modes de fonctionnement - Analyse fonctionnelle /BOI91/ /KER93/ /AUS93/**

L'élaboration du gestionnaire des modes de fonctionnement d'un système est effectuée à partir des spécifications et à travers une méthode basée sur une analyse et une représentation fonctionnelle de type SADT du système (voir Par. II-2).

#### **II-5-3-2- Génération automatique des gammes opératoires - Analyse opérationnelle et primitives de structuration /AMA92a/ /AMA92b/**

Nous proposons, dans ce mémoire, une méthode systématique pour générer automatiquement l'ensemble des gammes opératoires à partir des objectifs de production (gammes logiques). Elle a ainsi, comme point de départ, le modèle des gammes logiques, issu de la spécification, à partir duquel elle intègre progressivement les informations issues du modèle de la partie procédé pour enfin aboutir au modèle des gammes opératoires.

Ce développement progressif des gammes logiques est basé sur une analyse opérationnelle de la partie procédé. Cette analyse utilise les principes issus de la COO énoncés au chapitre I (Par. II-3) pour mettre en évidence les différentes primitives de structuration élémentaires (CLR). Ces primitives ou composants élémentaires sont relatifs à la nature (élémentaire ou complexe) et à la structure (nombre de lieux caractéristiques) des différentes ressources de production.

Ensuite, le développement final des gammes opératoires s'effectue par instanciation et par assemblage de ces primitives génériques de base.

### **II-5-3-3- Génération des gammes opératoires étendues - primitives de commande /HUV93/**

L'extension des gammes opératoires utilise les mêmes principes que ceux employés pour leur développement initial. En effet, des primitives de gestion/commande élémentaires représentant des graphes de comportement en coopération (synchronisation et communication), dans le cadre d'un échange de produit, et des graphes de sélection, pour la configuration des ressources, ont été développés. Ces différentes primitives de base ont été recensées et définies en vue de les assembler pour la génération des gammes opératoires développées.

### **II-5-4- Phase de validation**

#### **II-5-4-1- Validation statique des gammes /CRU91/ /AUS94/**

Cette validation statique des différentes gammes porte principalement sur :

- une démarche d'analyse des propriétés de terminaison propre et de vivacité du modèle de description des gammes afin d'assurer que toute gamme pourra être effectivement réalisée et que toutes les variantes prévues seront possibles,
- une méthode de recherche des blocages résultant d'une saturation des systèmes de transport ou d'une étreinte fatale liée à des utilisations croisées de ressources.

#### **II-5-4-2- Validation dynamique du système /AUS92/ /OHL92/**

La validation globale du système s'effectue par simulation du modèle complet. Cette validation permet de mesurer l'efficacité de la solution générée sur le plan quantitatif et qualitatif.

Comme énoncé au chapitre I (Par. II-3-4), deux approches sont possibles pour valider dynamiquement la solution : les démarches analytiques et les démarches de simulation.

En connaissant les avantages et les inconvénients de chacune d'entre elles, l'utilisation conjointe de ces approches semble la solution idéale.

Actuellement, seule l'approche par simulation a été mise en œuvre complètement /AUS92/ et certains travaux sont actuellement en cours /OHL92/ pour intégrer une démarche analytique basée sur les Réseaux de Petri Stochastiques ou les Réseaux de Files d'Attente dans un cadre d'évaluation des performances.

Cette seconde approche permettrait d'effectuer, à court terme, des validations préliminaires et intermédiaires du modèle de coordination (gammes) en cours de développement. Le développement progressif des gammes et la représentation en niveaux devraient favoriser cette approche.

L'évaluation rapide des performances devrait ainsi permettre d'effectuer un dimensionnement optimal du système et de déduire une politique de gestion de production performante par rapport à la production désirée.

#### **II-5-5- Phase d'implantation /HUV92/ /FAR93/**

Un modèle d'implantation, sous forme d'une maquette en langage ADA, a été réalisé /HUV92/. Cette maquette montre que l'on peut envisager un système de conception du gestionnaire de ressources (figure II-2-7) ayant pour objectif la génération de code contrôle/commande.

Dans un autre cadre, des travaux concernant la définition d'une méthode et d'une architecture informatique de gestion/contrôle de référence pour l'implantation, découpée en plusieurs couches, sont en cours de développement /FAR93/. Cette architecture de référence devrait permettre, par rapport à un cadre générique d'intégration, de supporter toute architecture spécifique de gestion/contrôle suivant une approche hiérarchique (niveaux de complexité) et systémique (modules informationnel, décisionnel et opérationnel).

Notons que d'autres travaux concernant la validation d'architecture de communication /RIA92/, par l'intermédiaire de réseaux informatiques, ont été développés et sont considérés comme une base intéressante pour les développements ultérieurs. Ils permettront de tenir compte des contraintes opérationnelles, dues aux caractéristiques des différents médias de communication, pour la validation de l'architecture complète (matérielle et logicielle) de gestion/contrôle.

## II-6- Conclusion

Dans cette partie, nous avons montré l'évolution et la définition du projet CASPAIM (1-->2) en termes de **concepts, de formalisation et de structuration**, en suivant une démarche rigoureuse. Par la même occasion, nous avons défini et décrit la contribution des travaux de ce mémoire.

Notons que nous avons ainsi contribué à l'émergence du concept fédérateur de ce projet concernant la notion de **lieu physique** et plus particulièrement celle de **lieu caractéristique**.

Le but de la mise en évidence des différents lieux physiques intervenant dans un échange de produit, est de représenter un système dont les acteurs ne sont pas les moyens de production mais les différents lieux où pourront s'effectuer les différentes opérations /MOR90b/.

L'objectif de cette approche est de dégager des invariants fonctionnels (partie commande) et matériels ou technologiques (partie opérative) de base associés à un lieu physique pour favoriser au maximum la réutilisabilité et la généricité dans la démarche d'analyse et de conception.

Ce qui revient à minimiser la partie spécifique aux équipements de production et à leur gestion à l'instar du système de gestion d'entrées/sorties périphériques (BIOS) du système d'exploitation DOS pour des raisons de portabilité sur différents types de micro-ordinateurs.

Cela aboutit à une **dématérialisation des équipements** (lieux physiques) permettant un découplage total. La gestion et la représentation de ces équipements reviennent alors à effectuer une association (organisation spécifique) de ces invariants de base permettant ainsi de pallier à l'hétérogénéité d'éléments de production sur la plan matériel et logiciel.

Notons, aussi, que la mise en évidence et l'utilisation d'invariants ou d'éléments génériques à partir de la notion de lieu physique permettent de rejoindre les idées établies dans le cadre du projet PTA, concernant les **constituants d'automatisation** (logiciels et matériels), et du projet ESPRIT-PRIAM, concernant l'intelligence distribuée (concept CMMS) à travers les **actionneurs et capteurs intelligents**.

Ce courant d'idées a pour origine, d'une part, le besoin de généricité, sans cesse croissant pour des raisons d'efficacité, dans la mise en œuvre de solutions d'automatisation.

D'autre part, une propriété intéressante concernant la partie opérative a conduit naturellement la recherche de solutions vers la modélisation du comportement de la partie opérative /ISM83/ /LHO85/ /PRU86/ /ALA86/ /DEF86/. En effet, un nombre restreint de classes technologiques d'éléments opératifs (moteurs, vannes, vérins...) constituent la plupart des applications.

Les avantages de ce concept, tels que la structuration, la surveillance (filtre de commande ou de comportement), la simulation, l'émulation..., ont largement été mis en évidence à travers les différents travaux effectués au laboratoire LACN de Nancy où une représentation analogue, basée sur la notion de 'poste-pièce' /VOG87/, a été définie.

Les différents travaux, faisant l'objet de ce mémoire, concernent la phase de spécification, plus particulièrement la partie procédé ou physique, et la phase de conception préliminaire du système de coordination. Cette phase de conception préliminaire correspond à une génération des gammes opératoires (figure II-2-8) par intégration progressive de l'équipement matériel de production (partie physique).

La démarche que nous proposons pour la spécification du système opérationnel et de génération systématique des gammes opératoires à partir de cette spécification est présentée dans la partie suivante.

Ces travaux utilisent pleinement les principes évoqués ci-dessus. Basés sur la notion de lieu, d'autres concepts ou objets d'automatisation, émanant de la partie physique, ont été définis et seront présentés par la suite. Il s'agit notamment :

- de la notion de **modèle de la partie opérative** /AMA90/ et d'**objet commandable** /ELK92/, similaire à la notion de filtre de comportement de la partie opérative,
- des **invariants fonctionnels** /AMA90/ représentant des **fonctions opératives** génériques définies, répertoriées et utilisées en tant que primitives de base de spécification et de modélisation de la partie procédé,
- des **primitives de structuration** /AMA92a/ pour la description des gammes (partie logique) dont la représentation est relative à la prise en compte de la partie physique (ressources) au niveau de ces gammes.

Les primitives de structuration sont étroitement liées à la notion de **modèle ou de filtre comportemental** d'une ressource complexe (structure interne) de la partie procédé dont les principes sont équivalents à ceux de la partie opérative mais sont appliqués à un niveau supérieur.

Notons, enfin, que d'autres travaux, aussi importants, n'ont pas été ici mis en évidence dans la présentation du projet CASPAIM2. Ils concernent notamment les problèmes de surveillance globale (détection, diagnostic, pronostic et recouvrement) /TOG92/ et de gestion de production (ordonnancement et planification) /HAM91/.

## Partie 3 : SPÉCIFICATION FORMELLE ET GÉNÉRATION AUTOMATIQUE DES GAMMES OPÉRATOIRES

### III- SPÉCIFICATION FORMELLE ET GÉNÉRATION AUTOMATIQUE DES GAMMES OPÉRATOIRES

#### III-1- Principe

La première phase de conception du système de coordination concerne la description formelle du système opérationnel constitué de la partie logique et physique.

Elle consiste à générer un modèle de description des objectifs ou **besoins fonctionnels** de production représentés par les différentes gammes logiques et les ressources de production constituant les différents **moyens matériels et opérationnels**.

Il est donc nécessaire de définir une méthode ou une technique de spécification systématique, pour des raisons d'informatisation, ainsi qu'un formalisme de description.

L'étape de **spécification de l'aspect logique**, relatif à la commande, a pour but de fournir une **première description formelle du système de coordination**. Cette première description (gammes logiques) servira ainsi de support de base pour le développement du modèle final suivant une approche de type prototypage lent ou progressif (figure II-3-1).

Alors que la **spécification de l'aspect physique** a pour but de fournir une description aussi complète et détaillée des différents moyens de production susceptibles d'être utilisés, ainsi que leur organisation spécifique et choisie au préalable, pour réaliser les objectifs de production. Donc le résultat de cette spécification est l'obtention d'un **modèle complet et final de la partie procédé**.

Comme énoncé au paragraphe II-1, la principale évolution du projet CASPAIM (1-->2) concerne la dissociation de ces deux aspects permettant ainsi une meilleure caractérisation du système et notamment une représentation spécifique et plus fine de la partie procédé.

Cette dissociation permet aussi de tracer clairement la frontière existante entre la spécification, exprimant le Quoi, et la conception préliminaire, exprimant le Qui, Où et Quand, de l'aspect commande.

En effet, considérant qu'une spécification doit être indépendante de toute mise en œuvre, chacune des deux spécifications doit être réalisée sans faire référence à aucun moment et en aucun cas à l'autre. Ainsi par combinaison de celles-ci, différentes **solutions** de mise en œuvre pourront être **décrites facilement** (figure II-3-1). De même, certaines modifications

pourront s'effectuer assez aisément par retours arrière, sans remettre en cause la totalité du système initial.

Cette approche permet ainsi l'élaboration d'une solution relative à une configuration particulière, obtenue par combinaison de trois catégories de spécification, exprimant les différents degrés de liberté pour établir cette configuration :

- choix d'un ensemble d'objectifs de production ainsi que de leur modification (ajout et/ou suppression de classes de produit)
- choix de matériels spécifiques de production parmi un ensemble constitué de certaines éventualités et possibilités fonctionnelles et suivant un compromis entre coût et efficacité,
- choix d'une organisation matérielle de production (disposition spatiale et géographique) en fonction du type du système de production (flow-shop, job-shop ou open-shop).

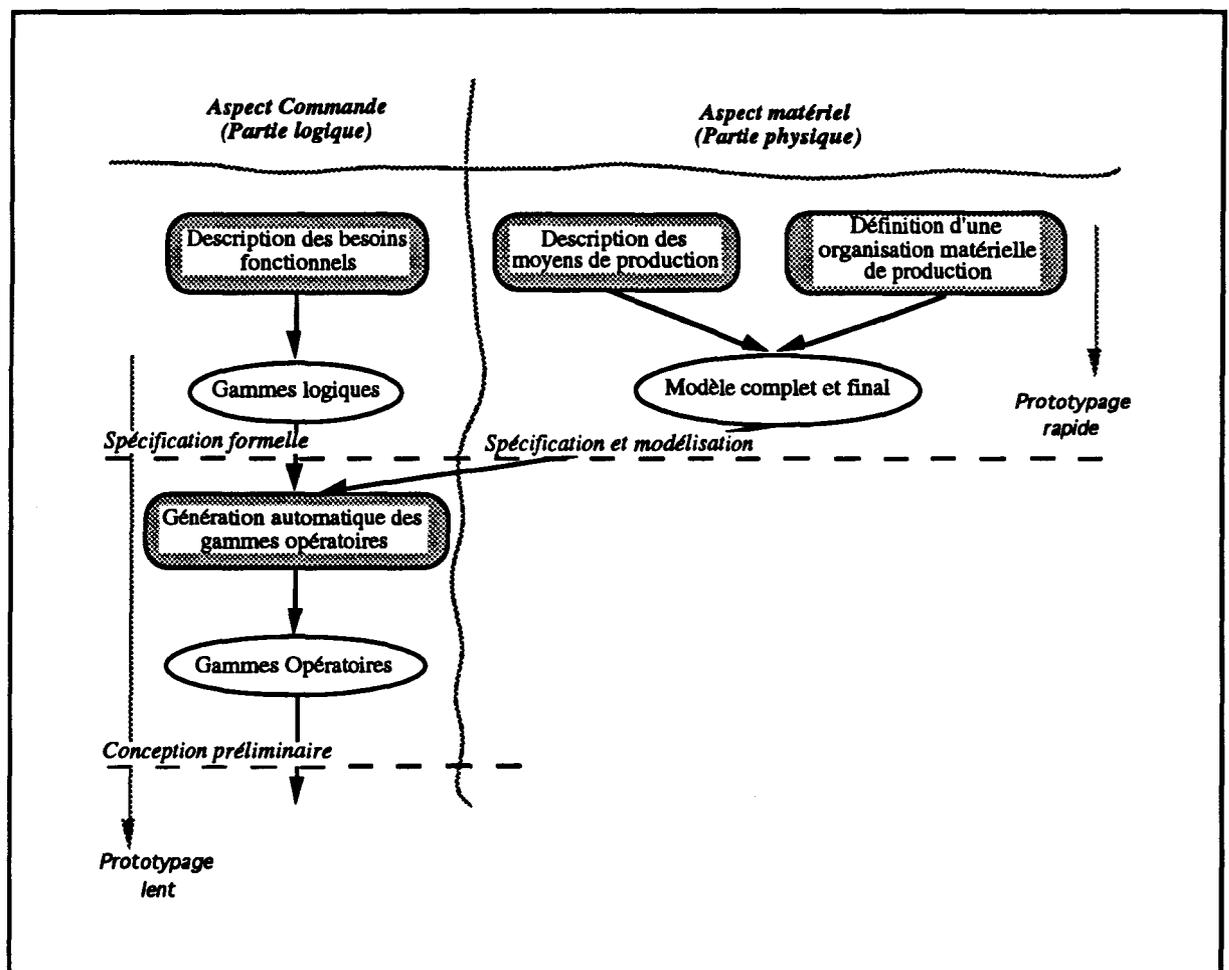


Figure II-3-1 : Principe de spécification et de conception préliminaire

La seconde phase de conception du système de coordination concerne l'analyse et la conception préliminaire du système opérationnel.

Pour cela, une **méthode de conception préliminaire** du système de coordination est définie. Cette méthode permet de générer et de développer progressivement, suivant plusieurs étapes, les différentes gammes logiques pour aboutir à une description intermédiaire de la solution finale de mise en œuvre (fig. II-3-1).

Cette description intermédiaire, représentée par les différentes **gammes opératoires**, est obtenue en effectuant une **analyse opérationnelle**, qui consiste à élaborer ces différentes gammes en intégrant progressivement les différentes informations relatives à la caractérisation de l'aspect physique (prototypage de la partie procédé).

Cette méthode de **développement des gammes opératoires** est **systématique** dans le sens où elle génère automatiquement des primitives de représentation correspondant à la prise en compte de l'aspect transitique relatif à chacun des moyens ou matériels de production. De même, l'aspect transitique relatif à l'ensemble des moyens de production est obtenu directement à partir de la description de l'organisation matérielle pré-définie en spécification.

Comme énoncé ci-dessus, le côté **dissociatif**, en spécification entre l'aspect logique et l'aspect physique, offre une certaine **souplesse** pour décrire plusieurs configurations par association de ces deux aspects et par modification de l'un indépendamment de l'autre. De plus, le côté **systématique**, en conception préliminaire, rend la démarche globale plus intéressante en offrant la possibilité d'obtenir et de tester **rapidement** plusieurs solutions et configurations résultantes de cette association.

### **III-2- Spécification et modélisation de l'aspect physique**

#### **III-2-1- Démarche de description**

##### **III-2-1-1- Description structurelle et fonctionnelle**

La démarche de description et de représentation de l'aspect physique, représentant la partie procédé, doit permettre, en partie, de mettre en évidence l'ensemble des lieux physiques qui constituent chacune des ressources de production.

Les différentes raisons, de cette mise en évidence, ont été énoncées dans la partie II et sont les suivantes :

- d'une part, pour appréhender le système physique de production suivant une vision privilégiant, non pas les ressources physiques comme principaux acteurs mais, les différents lieux physiques (ressources de base) les constituant et intervenant dans un échange de produit,

- et d'autre part, pour mettre en œuvre les principes de réutilisabilité et de généricité utilisés dans la démarche globale CASPAIM2 par l'intermédiaire d'invariants de base permettant de représenter les différentes ressources de production par association de ceux-ci (dématérialisation).

Il faut ainsi définir une **technique de décomposition systématique** de chacune des ressources. De ce fait, un ensemble de critères ont été retenus pour décomposer une ressource en sous-organes opératifs suivant une découpe fonctionnelle.

Cette décomposition est calquée sur la **structure fonctionnelle** de la partie opérative d'une ressource.

Cela se traduit par la définition d'un ensemble de **fonctions opératives élémentaires** en tant que **primitives de spécification** et de **modélisation**. Donc, ces fonctions devront être porteuses d'une sémantique bien définie pour la description et comporter un ensemble de caractéristiques, relatives à la nature de la fonction en question, pour la représentation.

Ces différentes fonctions devront permettre une description de n'importe quelle ressource de production par décomposition de sa structure mécanique pour mettre en évidence les différents sous-organes opératifs.

Comme défini pour les lieux physiques (Par. II-3-2-2), la nature d'une ressource de production est relative au type d'opération qu'elle est censée effectuer sur le produit.

Une **ressource** est ainsi considérée comme **dynamique**, c'est à dire prémunie d'une certaine activité et/ou mobilité (machine, robot, convoyeur ...) dont le but est d'élaborer une **opération de type transformation** vis à vis de l'état du produit (positionnel ou fonctionnel).

Une **ressource** est considérée comme **statique** si elle a comme objectif, en terme d'effet sur le produit, l'élaboration d'une **opération de type neutre** (stock tampon).

Les différents organes opératifs, constituant une ressource dynamique, représenteront les différents opérateurs intervenant dans la chaîne d'action pour élaborer la transformation. Ces organes sont soit terminaux, si ceux-ci se trouvent en bout de chaîne tels que les préhenseurs soit non-terminaux, si ceux-ci interviennent indirectement tels que les dispositifs matériels permettant le positionnement et le maintien des pièces et outils.

Par contre, les ressources passives représentant les différents lieux statiques, ayant uniquement pour fonction le stockage temporaire de produits, constituent des ressources élémentaires du point de vue de leur structure et donc, ne comportent aucun sous-organe.

L'objectif étant l'informatisation de la démarche par l'intermédiaire d'un outil CAO, les différentes fonctions de base devront être définies de sorte que l'on puisse respecter

les différentes propriétés caractérisant un CLR (modularité, abstraction, masquage d'information et indépendance fonctionnelle).

Le but étant bien sûr de définir une démarche mettant en œuvre les principes de la COO et d'hériter ainsi des différents avantages que procure une telle approche (Chap. I, Par. II-3).

Ainsi, le processus de spécification et de modélisation peut se décomposer en deux étapes correspondant grossièrement à la phase d'analyse et la phase de conception du cycle de développement préconisé en COO :

- **La décomposition structurelle** correspond à la mise en évidence des différents composants constituant une ressource et, de fait, des différentes fonctions opératives qui leur seront associées suivant une approche descendante de type SADT,

- **La description fonctionnelle** correspond à l'association d'une ou plusieurs fonctions à chacun des composants, mis en évidence dans l'étape précédente, permettant l'obtention d'un modèle final par association de ces fonctions.

La spécification d'une ressource de production s'effectue donc par décomposition de la structure fonctionnelle de sa partie opérative. Elle utilise comme point de départ, un ensemble de fonctions opératives de base qui ont été définies et classées au sein d'une bibliothèque.

La spécification d'une ressource débute alors par une description de sa structure, afin de mettre en évidence les différents organes opératifs qui seront ensuite associés à une ou plusieurs fonctions. Ce processus de description est schématisé par la figure II-3-2.

Le critère de décomposition est basé sur des liens de type "supportant/supporté" faisant apparaître une arborescence dans laquelle chaque organe appartenant à un niveau donné est support de la sous-structure inférieure.

Tous les organes intervenant dans une même branche sont donc solidaires mécaniquement. Le comportement d'un organe situé à un niveau donné influe sur ceux du niveau inférieur (interaction comportementale). Par contre, deux organes appartenant à deux branches différentes n'ont aucune influence, l'un vis à vis de l'autre, d'un point de vue comportemental.

Ensuite, une **mise en relation des différents moyens**, par établissement de relations externes d'accessibilité, est réalisée par spécification. Elle est effectuée en désignant pour chaque organe concerné, composant un moyen et pouvant supporter une pièce, le ou les organes, externes et éventuels, sur lesquels cette pièce pourra être transférée. Donc pour chaque moyen, on répertorie les différents organes à partir desquels il est possible d'effectuer une évacuation, ou un déchargement, de pièces vers l'extérieur. Et on précise, pour chacun

d'eux, les différents organes externes pouvant recevoir ces pièces lors d'un échange (chargement).

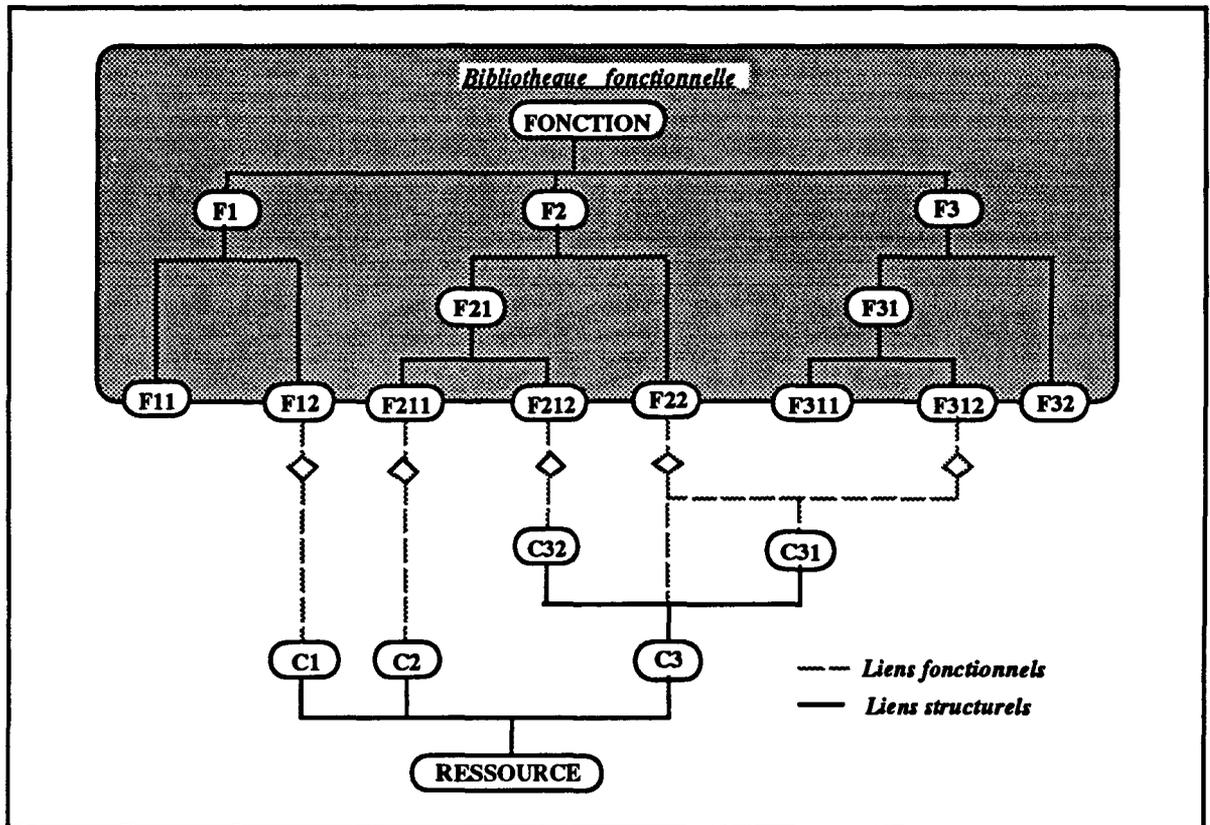


Figure II-3-2 : Démarche de description

### III-2-1-2- Contraintes de fonctionnement

Notons enfin, que certaines **contraintes de fonctionnement** seront décrites en phase de modélisation, pour des raisons de **sécurité** ou d'**efficacité** en terme de stratégie d'utilisation d'un moyen de production. Ces contraintes seront relatives au fonctionnement global d'une ressource, dont les conditions porteront sur l'état respectif des différents organes constituant un moyen de production.

Ces contraintes donnent ainsi la possibilité de traduire un mode d'utilisation, spécifique à une application donnée, de chacune des ressources.

Prenons l'exemple d'un robot, dédié au chargement/déchargement, et d'un centre d'usinage, constitué de deux tampons d'entrée/sortie, pour lesquels on autorise un travail en temps masqué dans un contexte d'efficacité. Cela se traduit par une attribution au robot d'autorisation d'accès à un des deux tampons libre lorsque l'autre est déjà occupé par une pièce en vue d'un traitement.

Puis, dans un contexte de sécurité, tout en gardant le même exemple, nous pouvons évoquer le cas où l'on interdit le déplacement du bras du robot et/ou la fermeture du sas de protection du centre d'usinage lors d'une opération de chargement/déchargement.

### III-2-2- Bibliothèque fonctionnelle

#### III-2-2-1- Notion de fonction opérative

Une fonction opérative peut avoir deux facettes par rapport à la commande.

Elle est soit **active**, c'est à dire que, pour être réalisée, elle est réceptive et tributaire d'une commande par l'intermédiaire d'un **actionneur** électrique, hydraulique ou pneumatique (moteur, vanne, vérin ...). Dans ce cas, elle permet de décrire le comportement dynamique d'une ressource.

Elle peut être **passive**, tel est le cas, par exemple, pour un stock rudimentaire (comportement statique) dont la fonction est de stocker, uniquement, un ou plusieurs produits temporairement.

Une fonction opérative permet ainsi de traduire un type de **comportement élémentaire** d'un **organe opératif vis à vis d'un produit**, tel que le positionnement, le stockage ou le maintien dont l'objectif global est d'effectuer une transformation sur ce produit.

Chaque organe représente ainsi un **opérateur élémentaire** dont le rôle est d'assurer une certaine **fonction opérative de base** en terme d'effet sur le produit sous forme d'une opération et par l'intermédiaire d'un et un seul **actionneur**.

#### III-2-2-2- Classification des fonctions

Les fonctions ont été classifiées en trois catégories :

- les fonctions de type **stockage** définissent les lieux physiques élémentaires pouvant recevoir un produit (pince de robot, section de convoyeur, broche d'un centre d'usinage, etc).

- les fonctions de type **mouvement** définissent les organes dotés d'un certain degré de mobilité tels que les dispositifs mécaniques animés d'un mouvement spatial (bras d'un robot, coulisse longitudinale ou transversale, etc),

- les fonctions de type **traitement** représentent l'ensemble des opérations, unaires et n-aires (assemblage), effectuées sur les produits et constituant les gammes logiques (transformations fonctionnelles). Ces fonctions ne sont pas élémentaires et représentent, en quelque sorte, une combinaison des deux autres catégories. De ce fait, elles n'apparaissent qu'au niveau initial de la structure arborescente d'un moyen de fabrication, dont l'essence même est d'apporter une transformation de l'état (intrinsèque et extrinsèque) des produits.

Le typage de ces fonctions représente la **sémantique de spécification**.

### III-2-3- Formalisme de description

Le formalisme de description est de type **relationnel et fonctionnel**.

L'aspect relationnel correspond à la représentation de la structure d'une ressource sous forme d'une arborescence. Dans cette arborescence, chaque noeud désigne soit la ressource en question dans le cas d'un noeud initial, soit un composant intervenant dans cette structure en tant que sous-organe à un niveau intermédiaire.

L'aspect fonctionnel correspond à la définition ou à la spécification fonctionnelle de chacun des organes opératifs mis en évidence lors de la décomposition structurelle.

Nous verrons dans le chapitre suivant que la définition des fonctions opératives induit une **décomposition structurelle d'au plus trois niveaux**.

Cette description **structuro-fonctionnelle** est représentée sur la figure II-3-3.

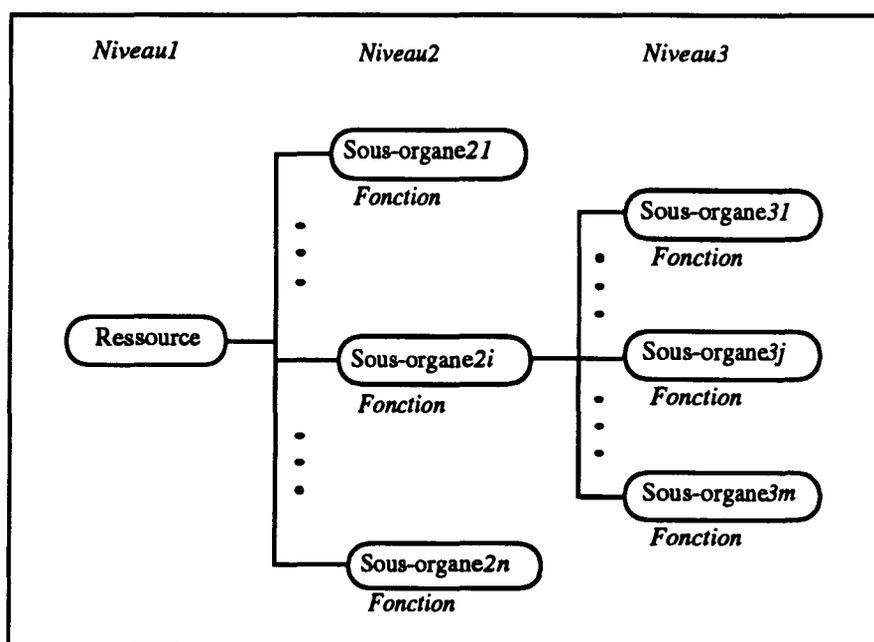


Figure II-3-3 : Description structuro-fonctionnelle d'une ressource

La spécification fonctionnelle des différents organes constituant la structure d'une ressource doit respecter une **syntaxe** régie par certaines règles de cohérence inhérentes au fonctionnement d'une ressource de production quelconque. La syntaxe pour une branche uniquement de la structure d'une ressource est la suivante :

Structure :	niveau initial	[niveau intermédiaire]	[niveau terminal]
Fonctions :	[traitement]	----> mouvement	----> stockage

Les crochets indiquent que le niveau correspondant ainsi que le type de fonction associé sont optionnels ou que la fonction uniquement est optionnelle.

Cette représentation indique, implicitement, que dans le cas d'une ressource à un seul niveau la fonction associée sera obligatoirement de type *stockage*.

Enfin, le typage des fonctions, représentant la **sémantique**, va permettre ensuite une recherche automatique des lieux caractéristiques. Cette recherche s'effectue, d'abord, par une première sélection des organes ayant été définis en tant que lieux physiques ou emplacements de stockage (fonction ou sous-fonction de type *stockage*). Ensuite, seuls les lieux ayant une relation d'accessibilité externe ou ayant été définis en tant que zones opératoires (lieux utilisés comme support de pièces pour l'exécution d'une fonction de type *traitement*) sont retenus.

### **III-2-4- Modélisation de la partie physique**

#### **III-2-4-1- Introduction**

Un modèle complet de la partie physique est généré automatiquement par spécification (figure II-3-1) et par l'intermédiaire d'un outil CAO, suivant une approche de type COO.

Et seule une **approche orientée objet** permet de mettre en œuvre les principes de base issus de ce type d'approche, tels que la notion de généralité et de réutilisabilité permettant de définir des modules génériques (CLR), de les archiver et de les réutiliser.

#### **III-2-4-2- Notion d'objet**

Les problèmes de représentation et de simulation de systèmes, qui resteront un domaine d'application privilégié de la POO /BEZ84/, furent à l'origine de ce nouveau concept.

Le principe de base se trouve essentiellement dans la notion d'**encapsulation** définissant un objet comme le regroupement d'une partie **statique**, ensemble de données (attributs) dont les valeurs caractérisent son état, et d'une partie **dynamique**, ensemble de procédures (méthodes) définissant son comportement (structure interne).

Chaque objet est considéré comme une **boîte noire** constituée d'une mémoire privée et de moyens d'accès (interface) à cette mémoire (figure II-3-4). L'interface représente le protocole d'accès et constitue un moyen de **protection des informations**.

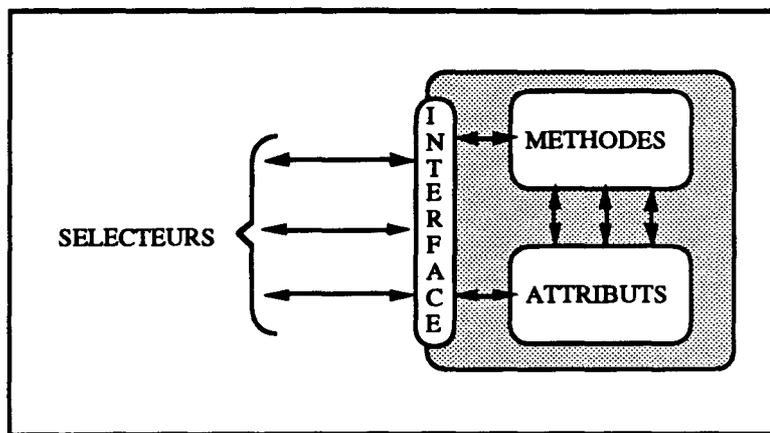


Figure II-3-4 : Notion d'objet

On distingue actuellement trois grandes familles de Langages à Objets (LO) dont les particularités sont décrites amplement dans de nombreuses références /CAR89/ /MAS89/ /ROC89/. Elles sont destinées à des classes de problèmes différents et privilégient chacune un point de vue sur la notion d'objet :

-- *les langages de classes* destinés aux problèmes de prototypage et basés sur un modèle “**classe/instance/héritage**”, sont très bien adaptés aux techniques du GL permettant d'appréhender facilement des applications de grande envergure,

-- *les langages de frames* issus des travaux sur le comportement humain et basés sur un **modèle à caractère relationnel**, sont employés actuellement dans le domaine de l'Intelligence Artificielle pour la représentation des connaissances,

-- *les langages d'acteurs* basés sur un modèle “**prototype/délégation**”, sont destinés à l'étude des systèmes distribués et mettent en oeuvre des mécanismes de communication privilégiant le parallélisme et l'asynchronisme.

Dans le cadre de la mise en oeuvre de notre démarche de modélisation, nous utiliserons principalement les notions issues des langages de classes et quelques notions des langages de frames, pour la représentation de la structure d'une ressource de production en terme de relations entre sous-organes.

### III-2-4-3- Représentation orientée objet

L'approche orientée objet confère aussi une souplesse de représentation, en préconisant une description naturelle des objets (propriétés statiques et dynamiques) constituant l'application considérée.

Ainsi, l'arborescence fonctionnelle est représentée sous forme d'une hiérarchie de classes d'objets (relations d'héritage). Chaque feuille représente une fonction élémentaire,

considérée comme une primitive de spécification, par l'intermédiaire de laquelle un comportement élémentaire est décrit.

Une **classe fonctionnelle** comporte un ensemble de **caractéristiques** (attributs) représentant les **paramètres de fonctionnement** (durées opératoires, capacités des lieux de stockage ...) et les **variables d'état** (occupation courante, état courant). De même, un ensemble de **procédures** (méthodes), décrivant un **comportement** particulier et modifiant les variables d'état (mode d'évolution), y sont définies.

L'association des comportements élémentaires, définis au sein des différentes fonctions opératives d'une ressource, décrit son comportement global.

Ensuite, une bibliothèque de ressources est également mise à jour en spécification. Chaque entité physique, se trouvant à un niveau quelconque (moyen de production ou sous-organe), sera représentée sous forme d'une classe par l'intermédiaire de deux caractéristiques principales (variables de classe) dont les valeurs sont issues de la définition d'une ressource ou d'un organe "prototype" (description structuro-fonctionnelle) :

- **<Composants>** : décrivant la sous-structure sous forme d'une liste de sous-organes physiques, constituant le niveau inférieur de la décomposition arborescente de l'entité,
- **<Fonctions>** : décrivant la ou les fonctionnalités de l'entité sous forme d'une liste de fonctions de base.

Ensuite, deux caractéristiques supplémentaires (variables d'instance) permettent de définir certaines fonctionnalités complémentaires, mais spécifiques au type de fonctionnement choisi (mode d'utilisation), pour une ressource donnée.

La première permet de définir ce fonctionnement particulier de manière globale vis à vis d'une ressource de production (niveau initial).

- **<Palettisation?>** : elle permet de représenter l'existence ou non d'un système de palettisation sur la ressource en question.

Cette caractéristique permettra, dans le cas voulu, de définir une gestion des palettes vides correspondant aux gammes TRL définies précédemment (Par. II-3-2-4).

La seconde est relative à chaque organe, d'une ressource, constituant une zone de stockage.

- **<Rel\_access>** : elle décrit la ou les relations d'accessibilité externes sous forme d'une liste représentant les différents organes externes sur lesquels un produit, initialement présent sur la ressource en question, pourra être transféré.

Toutes ces entités (ressources globales ou sous-organes) sont répertoriées sous forme de classes dans une base de prototypes pré-définis (figure II-3-5). Chaque prototype

représente un type de ressource ou, composant, ayant une structure et une définition fonctionnelle par défaut et facilement modifiable par spécification.

En effet, l'archivage et la gestion (création, modification et suppression) d'une ressource prototype s'effectuent par simple spécification des fonctions pré-définies définissant son comportement, et des composants définissant sa structure à un niveau inférieur uniquement. Et récursivement, chacun des composants appartenant à ce sous-niveau est défini de la même manière et ainsi de suite, jusqu'à atteindre les organes du niveau terminal.

Ainsi, chaque ressource globale et chaque sous-organe sont définis et gérés de la même façon au sein de la base.

On obtient ainsi une **réutilisation par composition** (construction de nouvelles entités par composition d'anciennes référencées au niveau de l'attribut <composants>) et par **génération** (instanciation d'une classe représentant une entité).

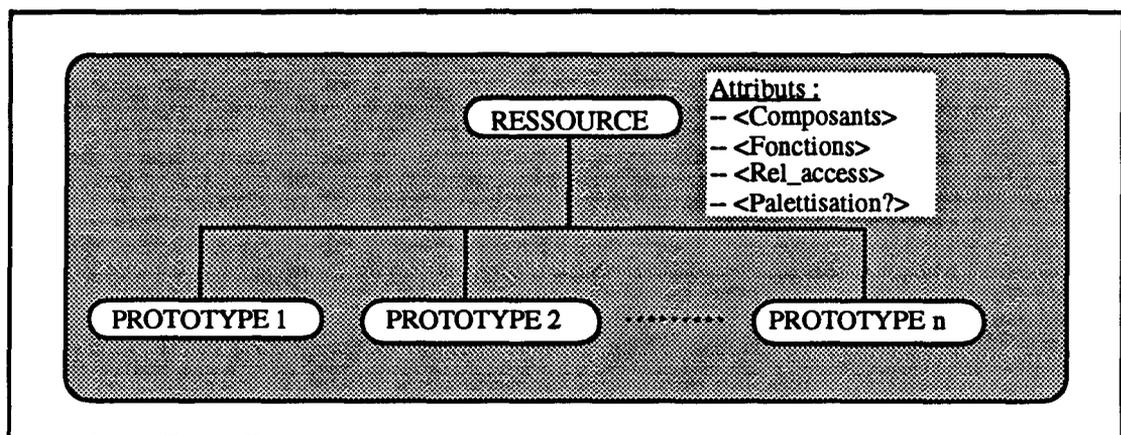


Figure II-3-5 : Base de modèles pré-définis

Notons qu'on obtient à la fois un modèle de conception (lieux caractéristiques), à partir du typage des fonctions, et un modèle de simulation (comportement fin), à partir de la description comportementale pré-définie au niveau interne de chaque fonction.

En phase d'exploitation (conception et simulation), le modèle final est obtenu par instanciation des ressources pré-définies (prototypes). L'instanciation d'une ressource génère alors automatiquement des instances fonctionnelles (classes fonctionnelles) au niveau de l'attribut <fonctions> et de manière récursive des instances prototypes (classes composantes) la constituant.

Les caractéristiques d'un prototype (ressource ou composant) sont représentées par l'union des caractéristiques de chacune des fonctions le définissant et représentant un point de vue fonctionnel particulier (attributs). De même, le comportement d'un prototype est obtenu par association des comportements élémentaires définis au sein des classes fonctionnelles (procédures).

Ensuite, des valeurs spécifiques et propres au système modélisé sont affectées aux caractéristiques représentant les paramètres de fonctionnement de ces ressources.

### **III-2-5- Conclusion**

La description de la partie physique est abordée suivant **trois aspects fondamentaux** concernant les **composantes structurelle, fonctionnelle et comportementale**, et permettant de caractériser complètement un système physique.

Notons que pour un même système, la représentation suivant ces trois composantes n'est pas unique.

Dans notre approche, les fonctions sont définies en tant que primitives de spécification et de modélisation qui sont ensuite associées aux différents noeuds de la structure. Chacune de ces fonctions comporte deux types d'information :

- le **type** correspondant à la sémantique utilisée pour la spécification,
- et le **comportement** décrit par chacune de ces fonctions en phase de modélisation.

Il n'y a donc qu'une décomposition structurelle associée à une spécification fonctionnelle.

D'autres approches ont été développées en vue de la représentation structuro-fonctionnelle. Elles sont spécifiques et relatives à leur propre objectif en utilisation et dont les concepts sont souvent issus de la théorie des systèmes /LEM84/. Elles combinent notamment une décomposition purement fonctionnelle et une décomposition purement structurelle avec primauté ou non du modèle fonctionnel sur le modèle structurel ou vice versa.

Ces travaux s'inscrivent principalement dans le cadre du diagnostic en surveillance de systèmes tels que ceux de A.K.A. Toguyeni /TOG92/ dans le cadre du projet CASPAIM et ceux de B. Chandrasekaran /CHA89/.

Notons que certains travaux ont été développés aussi dans le cadre de la conception des systèmes de production notamment au laboratoire CRAN de Nancy dans le domaine de la transitive /CHA91/ et du prototypage /TIX89/ /PAN91b/. Concernant le prototypage, l'outil SPEX qui a été développé dans ce domaine, est basé sur la même notion de boîte fonctionnelle ou, fonction opérative, permettant de décrire un comportement élémentaire.

### III-3- Spécification formelle et conception préliminaire de l'aspect logique

#### III-3-1- Formalisme de spécification de la partie logique

La spécification de la partie logique consiste donc à décrire fonctionnellement le processus de fabrication, représenté par une gamme logique, de chacun des produits à fabriquer. Chaque processus est représenté par une gamme logique suivant un graphe de type **RdP ordinaire** (figure II-3-6).

Chaque **place** de ce graphe représente un **état d'avancement** du produit et chaque **transition** une **opération** transformant cet état (transformation fonctionnelle).

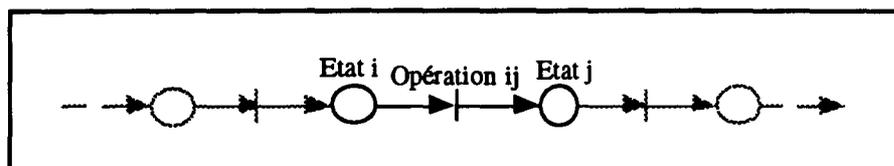


Figure II-3-6 : Description d'une gamme logique

A partir de cette représentation élémentaire, deux types de gammes sont alors possibles, en fonction de la nature du processus de fabrication en question que l'on peut différencier ainsi :

- processus constitué de traitements **unaires**, exclusivement, ne faisant intervenir qu'un seul produit à la fois tels que les transformations physiques (usinage, conditionnement...) et les opérations de mesure/contrôle (métrologie...),

- processus constitué d'une ou plusieurs opérations **n-aires** faisant intervenir deux produits au minimum (assemblage et désassemblage).

Dans la première catégorie (figure II-3-7), la structure de la gamme est élémentaire et purement linéaire.

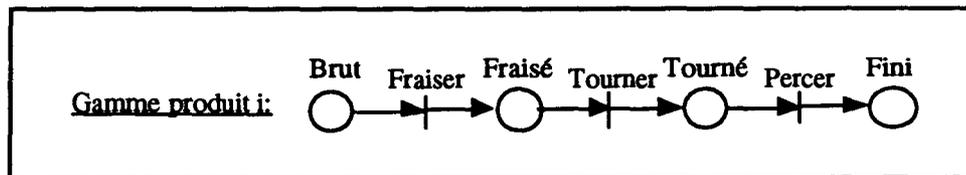


Figure II-3-7 : Description d'un processus élémentaire

Pour la seconde catégorie, deux phases sont à considérer : la phase amont et la phase aval à l'opération effective. En effet, une opération d'assemblage, par exemple, peut être considérée comme une composition (synchronisation et liaison) de gammes élémentaires, représentant le processus de fabrication de chacun des produits mis en jeu dans la phase

amont. Ensuite, en phase aval, il y a création d'une nouvelle gamme élémentaire représentant le produit résultant de l'association des gammes amonts. Cette association s'effectue par synchronisation sur une transition commune (figure II-3-8).

Toutes ces considérations sont aussi valables pour une opération de désassemblage.

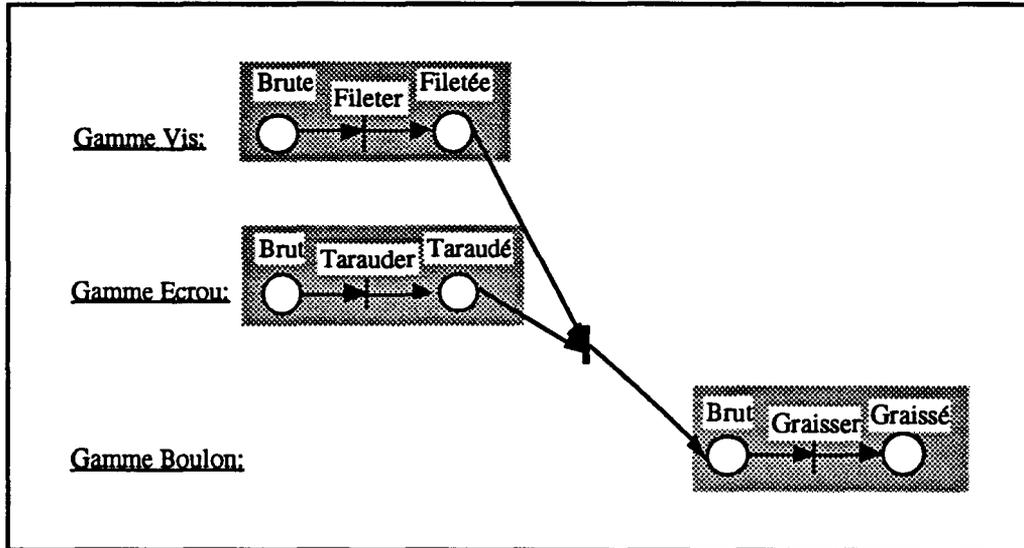


Figure II-3-8 : Description d'un processus d'assemblage

La spécification doit intégrer la **flexibilité d'ordre des opérations** mettant en évidence toutes les combinaisons possibles dans le processus de fabrication. La représentation des permutations, au niveau des gammes logiques, s'effectue par duplication de la portion où doit apparaître cette flexibilité. Il en résulte un graphe avec alternatives (figure II-3-9) introduisant un indéterminisme directionnel qui sera résolu à un niveau supérieur par le module décisionnel.

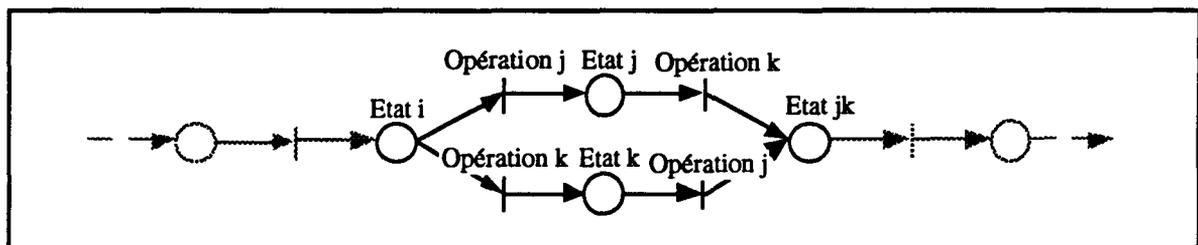


Figure II-3-9 : Description d'un processus avec alternative



-1- La première phase consiste à spécifier les différents moyens de fabrication susceptibles de réaliser les différents traitements apparaissant au niveau des gammes logiques. C'est à ce niveau que la flexibilité de choix des machines est intégrée.

Ensuite une transition de type transfert est générée et intercalée entre deux traitements consécutifs pour indiquer le transfert entre machines.

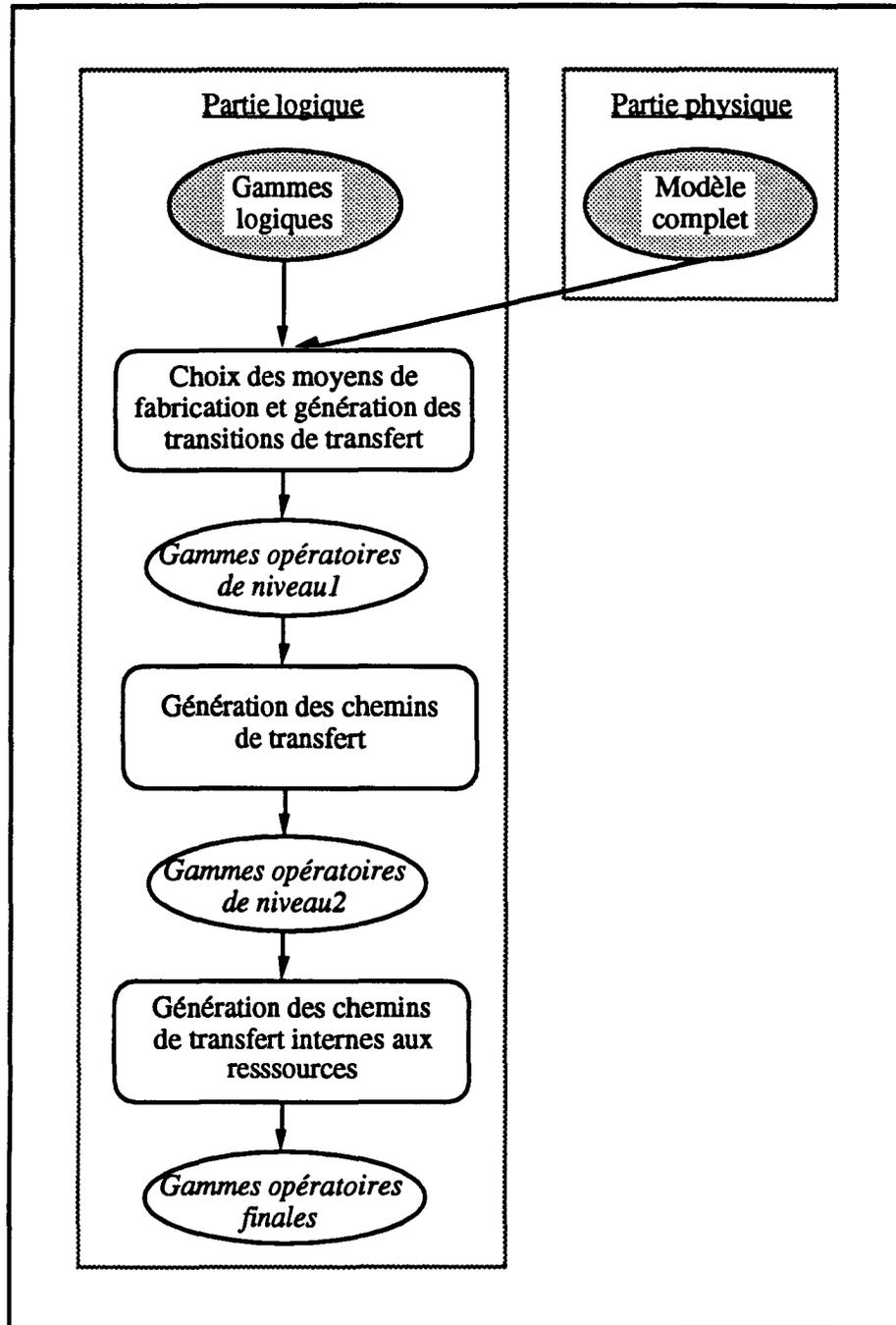


Figure II-3-11 : Démarche de génération

-2- La seconde phase consiste à intégrer l'aspect transitique par génération des différents chemins de transfert correspondant aux transitions de transfert obtenues au niveau précédent.

A ce niveau l'ensemble des moyens intervenant dans un transfert de produit entre deux machines consécutives, au niveau des gammes, sont représentés. Ces moyens sont relatifs au transport, à la manipulation et au stockage.

Les chemins sont déterminés par l'intermédiaire des relations d'accessibilité externes aux ressources.

Chaque transition de type transfert apparaissant sur les gammes de niveau1 est donc éclatée ou remplacée par une portion de graphe. Sur cette portion, chaque place représente un moyen de transfert et chaque transition un échange de produit entre deux moyens de transfert.

Chaque chemin de transfert est ainsi représenté à l'image de la figure II-2-3.

-3- La dernière phase consiste à générer les chemins de transfert interne et propre à chaque ressource. Pour cela un modèle général et générique est employé sur lequel sont représentés uniquement les lieux caractéristiques.

Ce modèle représente un **module de transfert** qui est ensuite spécialisé en fonction du type de ressource concernée (nombre de lieux caractéristiques et non caractéristiques) et de la gamme où celle-ci intervient (type de produit).

Ce type de représentation permet, d'une part, de gérer de manière commune et à un même niveau d'agrégation les différentes ressources quelque soit leur degré de complexité structurelle et fonctionnelle.

D'autre part, cela permet une représentation adéquate et précise des différents échanges de produits en mettant en évidence les lieux physiques devant être gérés lors d'un échange.

A ce stade, chaque place apparaissant sur une gamme opératoire de niveau2 et correspondant à une ressource est remplacée par un module de transfert dont la représentation est décrite par la suite.

### **III-3-2-3- Représentation des modules de transfert**

Les modules de transfert permettent de mettre en évidence la nécessité ou non d'une gestion interne des différents flux spécifiques à la nature de chaque ressource (complexe ou élémentaire).

Ils sont représentés sous forme d'un modèle reliant l'ensemble des lieux internes aux lieux caractéristiques (lieu d'accès et lieu opératoire).

Le modèle général de base (figure II-3-12) est donc représenté sous forme d'un module. Sur ce module, tous les lieux caractéristiques d'une ressource sont représentés en entrée et en sortie de ce module sous forme d'une place.

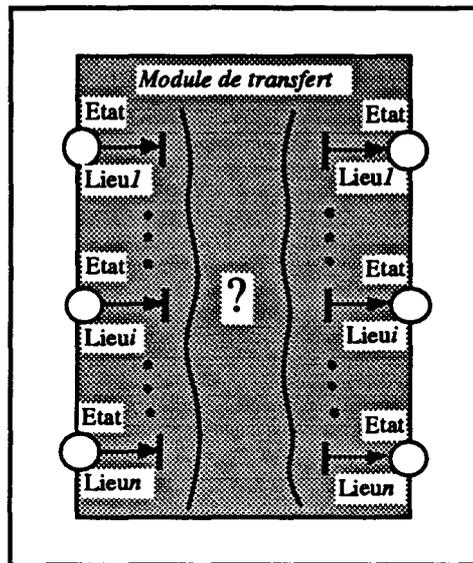


Figure II-3-12 : Modèle général de base

Ensuite, le type de représentation utilisé en interne de ce module est spécifique à la nature de la ressource.

En ce qui concerne une ressource complexe, deux types de représentation sont possibles en fonction de l'existence (cas1) ou de la non-existence (cas2) de relations d'accessibilité internes, directes ou indirectes, entre les différents lieux caractéristiques.

Pour le premier cas, une place supplémentaire apparaît et un lieu symbolique (*En-Voyage*) lui est affecté. Ce lieu signifie la présence de transferts internes à un moyen de production nécessitant une commande ou une gestion locale qui relève du système de contrôle propre à ce moyen.

Les relations d'accessibilité internes sont décrites implicitement par l'intermédiaire de la définition fonctionnelle. Certaines fonctions intègrent des liens concernant des échanges de pièces au niveau de leurs lieux caractéristiques (Chap. III).

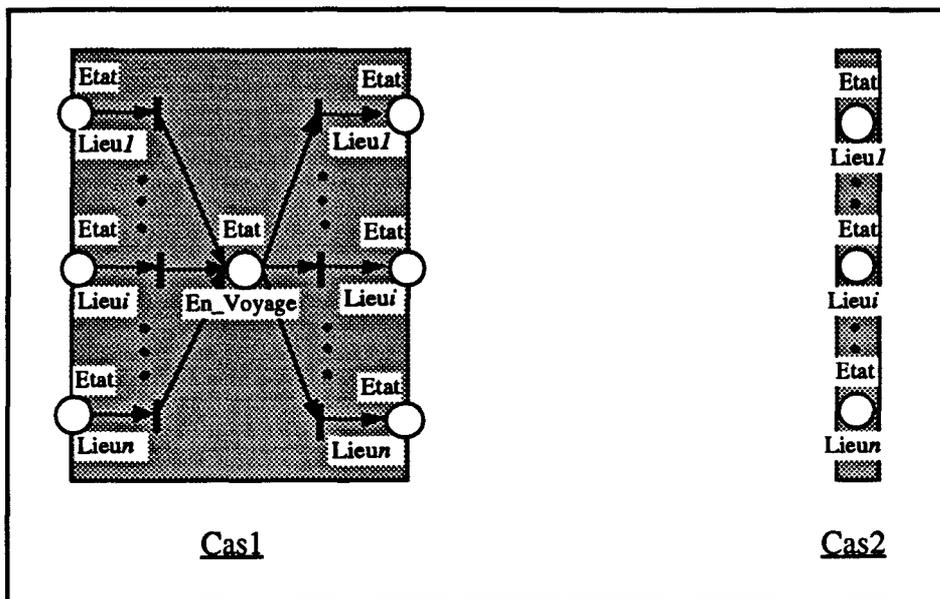


Figure II-3-13 : Modèle spécifique à une ressource complexe

Le modèle le plus élémentaire représente évidemment les ressources dites non complexes ou élémentaires, c'est à dire comportant uniquement un lieu qui est de fait caractéristique.

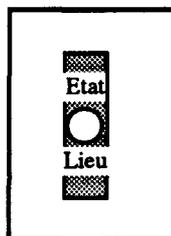


Figure II-3-14 : Modèle élémentaire

Néanmoins, une représentation spécifique et relative aux ressources constituées de lieux physiques dits accédés et mobiles, est employée tout en gardant le côté systématique en modélisation mais particulier à ce type de ressource.

En effet, pour ce type de ressource, les lieux caractéristiques physiques étant mobiles ne peuvent être représentés directement au niveau des modules. C'est en effet pour pouvoir identifier la zone d'accès, pour ce type de lieu, que la notion de lieu caractéristique virtuel a été introduite (Par. II-3-3-5).

La représentation générale, ainsi que la démarche de spécialisation, est analogue à celle présentée ci-dessus, mais en remplaçant les lieux caractéristiques physiques par les lieux virtuels.

L'association entre les lieux d'accès et les lieux mobiles, référencés par ceux-ci, ainsi que la mise à jour sont effectuées au niveau de la gestion interne.

Notons enfin qu'un modèle représentant le graphe de transfert interne et complet, propre à une ressource dite complexe, est généré de manière systématique.

Ce modèle interne est relatif à la description structuro-fonctionnelle et notamment à la nature des fonctions opératives définissant chacun des lieux ainsi que leur organisation relative à la structure de la ressource en question.

La représentation de ces graphes de transfert étant liée à la nature des fonctions opératives, définissant les lieux composant une ressource, sera étudiée par la suite lors de la description détaillée de ces fonctions.

#### **III-3-2-4- Génération des gammes TRL**

Une gamme TRL représente le graphe de transfert, interne à une ressource, d'un type de support en phase de non-affectation, c'est à dire lorsqu'il devient libre de toute affectation à un produit (Par. II-3-2-4).

Un graphe TRL est intimement lié au modèle interne d'un module de transfert représentant la ressource pour laquelle cette gamme décrit le trajet interne de ces supports. En effet, il constitue une partie de ce modèle, l'autre partie représente le trajet des produits en cours d'affectation et donc commun au support.

#### **III-3-2-5- Génération des gammes TL**

Une gamme TL d'un type de lot est forcément **cyclique** puisque ces entités sont considérées en tant que ressources devant être, à un moment donné, affectées puis restituées pour une prochaine affectation.

Ensuite, ce type de gamme nécessite un lien avec la gestion au niveau produit, c'est à dire les gammes opératoires classiques. Cette **liaison** sera représentée par un **lien logique**, du point vue opérationnel, indiquant la **frontière** entre les deux niveaux de gestion, lot et produit individuel.

Dans ce contexte de transfert par lot, une **ressource** particulière de production, notamment de stockage, doit jouer le rôle d'**interface** correspondant au point de rencontre et au point de séparation entre ces **types d'entité de gestion** (lot et produit).

C'est au niveau de cette ressource (RI), au sein des gammes opératoires et des gammes de transfert, que le lien logique est effectué (figure II-3-15).

La représentation du module de transfert pour cette ressource, commune aux deux types de gammes, est différente. En effet, l'unité de stockage étant différente, la prise en compte des lieux d'accès sera différente.



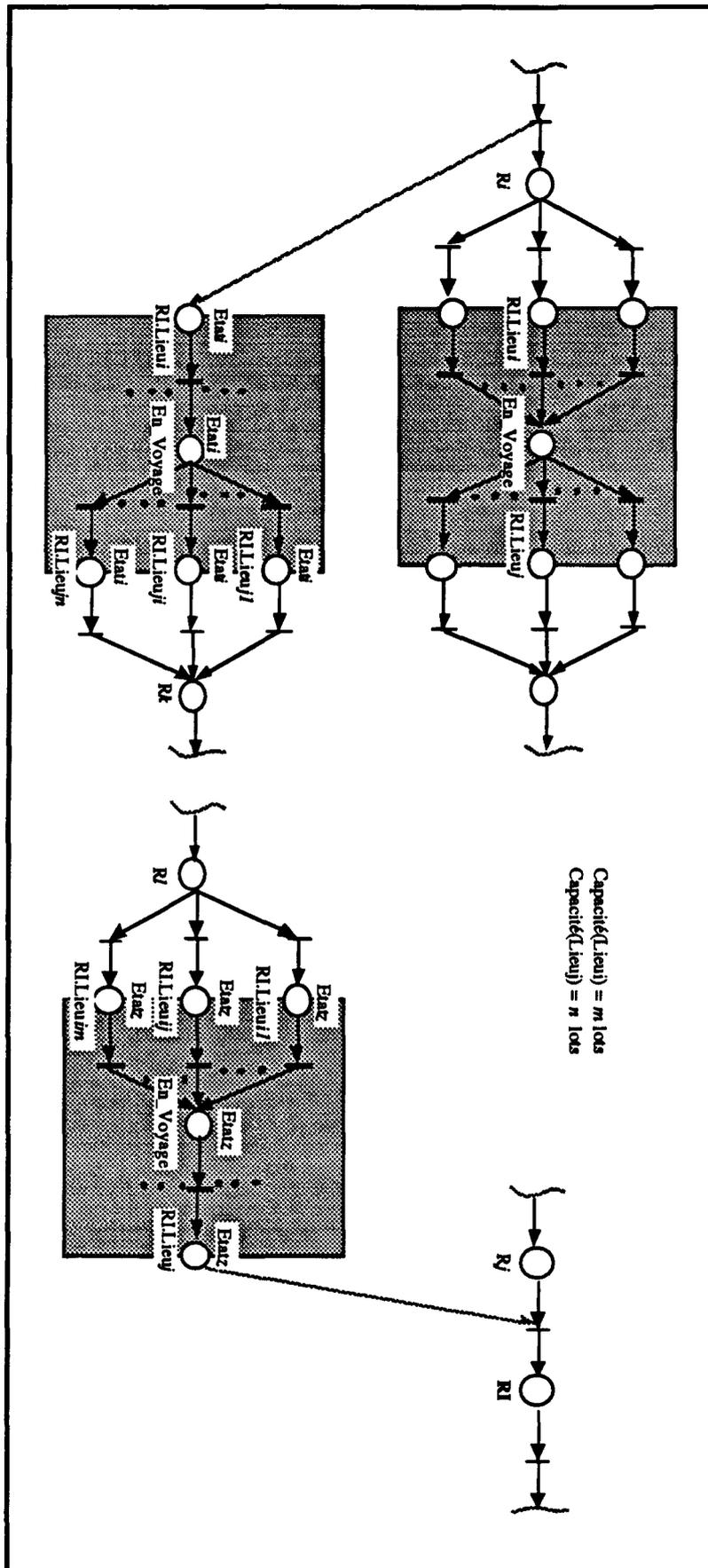


Figure II-3-16: Gamme de transfert d'un lot détaillée

Pour cela, au sein de la gamme d'un lot, chaque place, représentant un lieu caractéristique et apparaissant au niveau du module de transfert de la ressource d'interface, sera dupliquée pour pouvoir représenter ce module de manière adaptée au sein de la gamme du produit.

Cette duplication permet d'adapter les zones d'accès et les capacités de stockage en fonction de l'unité de stockage.

Au niveau de la gamme du lot, la capacité d'un lieu caractéristique utilise comme unité de stockage 'un lot' (unité de gestion). Et au niveau de la gamme d'un produit, l'unité de gestion étant 'un produit', les lieux d'accès deviennent les lots.

En effet, les différentes zones d'accès sont les différents lots pouvant être simultanément sur le lieu caractéristique de cette ressource d'interface, c'est à dire la capacité de ce lieu.

Ainsi, la duplication des places présentes en sortie, pour une représentation en début de gamme (déchargement des produits), et en entrée, pour une représentation en fin de gamme (chargement des produits), est schématisée sur la figure II-3-16.

### **III-4- Conclusion**

Dans cette partie, nous avons présenté, de manière générale, la démarche de spécification formelle et de conception préliminaire du système de commande/coordination à partir du prototypage de la partie procédé.

La démarche de génération des gammes opératoires, correspondant à une conception préliminaire, est basée principalement sur une analyse opérationnelle de la partie physique.

Cette analyse porte sur une étude de la structure et de la nature des différentes fonctions définissant chacune des ressources de production ainsi que la prise en compte de leur interaction comportementale (relations d'accessibilité) pour un type de production donné.

La démarche ne peut être décrite plus amplement qu'en ayant connaissance de manière précise des différentes fonctions représentant les primitives de spécification.

De ce fait, nous proposons, dans le chapitre suivant, de détailler ces fonctions et de les illustrer par des petits exemples et enfin de présenter de manière précise la démarche de génération sur un exemple général.

## **CHAPITRE III**

### **MISE EN ŒUVRE DE LA DÉMARCHE**

## Partie 1 : DESCRIPTION DÉTAILLÉE DES FONCTIONS OPÉRATIVES

### I- DESCRIPTION DÉTAILLÉE DES FONCTIONS OPÉRATIVES

#### I-1- Introduction

L'identification des différentes fonctions de base s'est effectuée en analysant le fonctionnement et le comportement des mécanismes automatisés constituant l'ensemble des moyens de production.

Cette analyse a permis de mettre en évidence des invariants de fonctionnement et de comportement représentés par les différentes fonctions opératives que nous proposons de détailler dans cette partie.

Chacune de ces fonctions représente ainsi un comportement actif ou passif en fonction de la présence ou non d'un système d'actionnement (actionneur).

#### I-2- Classification fonctionnelle orientée objet

Les différentes fonctions ont été implémentées suivant une approche orientée objet pour, tout d'abord, adopter une politique de COO, en terme de CLR, dans le cadre de leur exploitation.

Mais d'un point de vue mise en œuvre de ces fonctions, cette approche a permis de mettre en commun des caractéristiques et des comportements généraux, au sein de classes "objet" à un niveau d'abstraction supérieur.

Ensuite, la notion d'héritage permet de spécialiser ou d'affiner ces comportements en les modifiant de manière plus ou moins importante soit avec les mêmes caractéristiques, soit en ajoutant de nouvelles caractéristiques (contraintes supplémentaires).

Nous obtenons ainsi une hiérarchie de classes "objet" représentant l'arborescence fonctionnelle, dont les classes initiales représentent les trois catégories principales de fonctions opératives (Chap. II, Par. III-2-2-2), et dont les feuilles (classes terminales) représentent les fonctions opératives de base.

Seules les classes terminales sont utilisables en tant que telles soit en spécification (primitives typées) soit en modélisation par instanciation (comportements de base). Elles représentent les primitives opératives qui constituent la bibliothèque fonctionnelle (figure III-1-1).

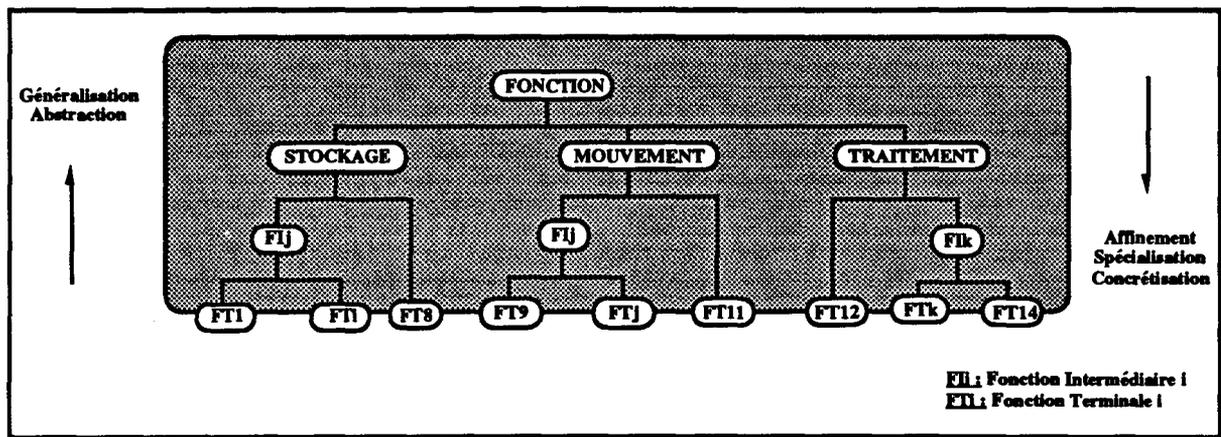


Figure III-1-1 : Bibliothèque fonctionnelle

La description d'une primitive opérative est donc effectuée à travers les différentes caractéristiques (attributs) et les différentes procédures (méthodes) définissant la classe fonctionnelle "objet" correspondante (Chap. II, Par. III-2-4-2) au sein de cette bibliothèque.

Les **caractéristiques** représentent les **paramètres de fonctionnement** et les **variables d'état**. Ces caractéristiques sont relatives à un point de vue particulier (fonctionnel) d'une ressource ou, d'un sous-organe, de production qui comportera la fonctionnalité (fonction opérative) en question.

Les **procédures** décrivent le **comportement** relatif à la fonction opérative en question. Les **sélecteurs**, ou identificateurs, permettant de référencer ces procédures correspondent aux différents **commandes** pouvant être envoyées pour faire évoluer et modifier l'état caractéristique relatif à la fonction (variables d'état).

Ainsi, pour une primitive présentant un aspect actif (actionneur), ces commandes correspondront aux actions envoyées au système d'actionnement permettant de réaliser cette fonction.

Et pour une primitive ayant un caractère passif, ces commandes correspondront aux procédures permettant de mettre à jour les états caractéristiques relatifs à cette fonction, qui devront forcément être modifiées par un dispositif externe comportant une fonction active.

Au sein de cette taxonomie représentant la bibliothèque fonctionnelle, **quatorze primitives** ont été définies et archivées dont :

- huit de type 'stockage',
- trois de type 'mouvement',
- et trois de type 'traitement'.

### **I-3- Fonctions de type 'Stockage'**

#### **I-3-1- Description du comportement global**

Cette catégorie de fonctions met en évidence la propriété d'un système ou d'un organe physique, appartenant à la partie procédé, à pouvoir recevoir une ou plusieurs entités de stockage, sur un emplacement (support) réservé à cet effet, de manière temporaire.

Cette **entité de stockage** désigne tout objet physique pouvant être manipulé et étant non solidaire physiquement d'une ressource de production. Nous avons donc les différents **produits** mais aussi les différents supports énoncés dans le chapitre précédent tels que les **supports d'interface** (palette, plateau de bridage ...), à capacité unitaire, et les **supports de transport groupé** à capacité multiple (plateau ou lot de produits).

#### **I-3-2- Description des caractéristiques globales**

Quatre caractéristiques communes, constituant les paramètres de fonctionnement et les variables d'état, définissent les fonctions de stockage.

##### **I-3-2-1- Les paramètres de fonctionnement**

Les **paramètres de fonctionnement** représentent les caractéristiques statiques d'un lieu physique. Trois paramètres permettent de définir un lieu quelconque.

-1- La **capacité** maximale du lieu physique comportant cette fonctionnalité. Elle s'exprime en nombre d'unités logiques de stockage.

L'**unité logique** de stockage est une référence commune de base, choisie préalablement par l'utilisateur en phase de spécification, pour exprimer la taille exacte ou approximative, tout en étant représentative, en nombre d'unités des différentes entités susceptibles d'être stockées.

-2- La **liste des différents types d'entités** pouvant séjourner sur le lieu en question. Les identificateurs de chaque classe d'entité sont spécifiés.

-3- Et le **type d'accès** au lieu considéré. Cette caractéristique définit la **nature** ou la **structure interne du lieu**, dans le cas d'une capacité multiple, par l'intermédiaire d'une fonction d'accès. Cette fonction d'accès définit le comportement d'un lieu (évolution de sa capacité) lors d'une opération de stockage (ajout ou retrait).

Quatre types de **fonction d'accès** ont été définis (Fifo, Lifo, Indexé et stochastique) :

- La fonction de type "FIFO" (First In First Out) correspond à une structure en file dont l'entité positionnée en queue représente le dernier ajout et l'entité positionnée en tête représente le prochain retrait. Elle permet de représenter, par exemple, un canton de convoyage (figure III-1-2).

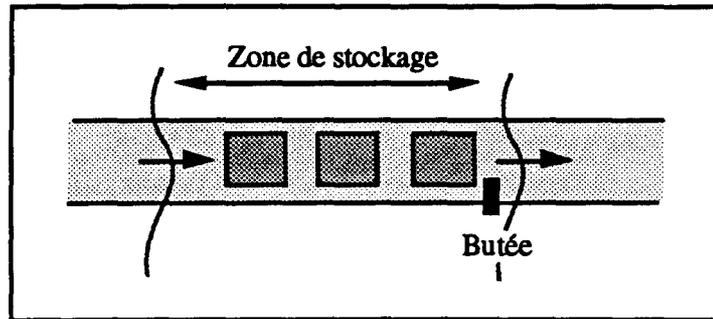


Figure III-1-2 : Structure de stockage de type FIFO

- La fonction de type "LIFO" (Last In First Out) permet de représenter, éventuellement, une zone de stockage ayant une structure en file mais de manière verticale, pour laquelle l'entité la plus hautement positionnée correspond à la dernière entrée et à la prochaine sortie (figure III-1-3).

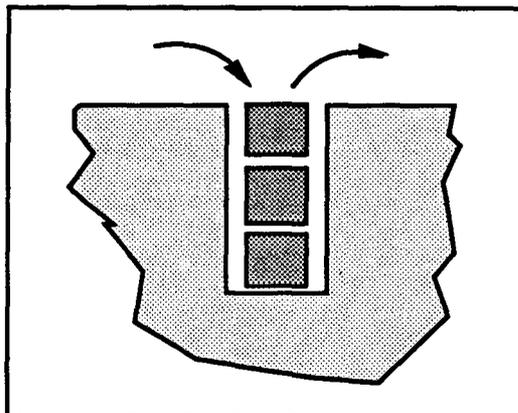


Figure III-1-3 : Structure de stockage de type LIFO

- La fonction de type "Indexé" correspond à une zone de stockage dont la structure est indexée (figure III-1-4) et dont l'accès à une entité particulière se fait par indication de sa position, connue par l'intermédiaire de deux coordonnées spatiales (i,j).

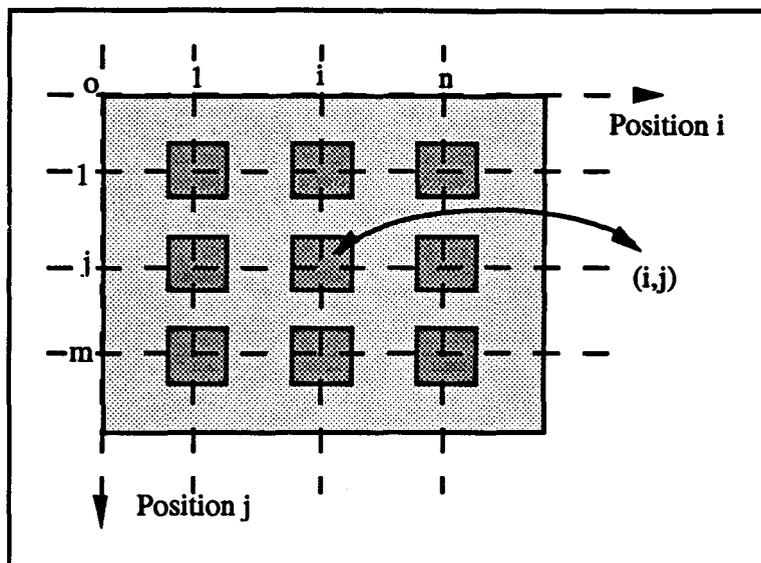


Figure III-1-4 : Structure de stockage indexée

- La fonction d'accès de type "stochastique" correspond à un accès à une zone de stockage, en vue d'un retrait uniquement, suivant une loi aléatoire prédéfinie. Cela permet éventuellement, en phase de simulation, d'analyser le comportement d'un système en mettant en évidence et/ou en étudiant les différents points singuliers (goulots d'étranglement, ressources critiques ...).

La structure de la zone en question n'a donc aucune importance puisqu'un tirage aléatoire est effectué parmi un ensemble d'entités dont le résultat n'est pas assujéti à l'organisation de ces dernières.

### I-3-2-2- Les variables d'état

Les variables d'état représentent les caractéristiques dynamiques dont les valeurs sont données (valeurs initiales) et modifiées en phase de simulation.

Une seule variable commune et significative permet de représenter l'état d'une fonction de stockage de manière générale, c'est à dire quelque soit sa spécificité.

En effet, le seul état caractéristique commun à l'ensemble des lieux de stockage concerne l'occupation courante d'un lieu qui indique le nombre et la nature des différentes entités présentes à un instant donné.

L'occupation courante d'un lieu peut être exprimée soit en nombre d'unités physiques, c'est à dire le nombre d'entités présentes réellement sur le lieu correspondant, soit en nombre d'unités logiques, c'est à dire la taille occupée par l'ensemble des entités présentes exprimée en unité logique.

Certaines variables supplémentaires seront nécessaires pour décrire l'état caractéristique d'un lieu de stockage présentant une certaine activité, comme nous le verrons par la suite.

### I-3-3- Représentation arborescente

Parmi les fonctions de stockage, nous proposons deux sous-catégories (figure III-1-5) :

- le stockage dit "passif", d'un point de vue comportemental, représente la seule catégorie de fonction ayant un comportement passif au sein de la bibliothèque complète,

- le stockage dit "actif" concerne les systèmes présentant un caractère actif vis à vis du chargement et du déchargement du contenu de leurs emplacements de stockage (occupation) tels que l'évolution dynamique du contenu ou l'interdiction momentanée de décharger ce contenu par l'intermédiaire d'un système de blocage.

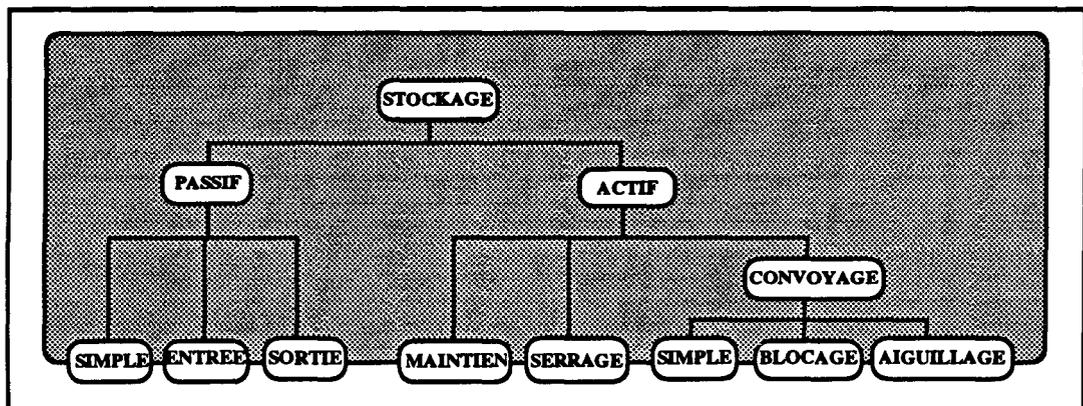


Figure III-1-5 : Représentation arborescente des fonctions de stockage

La nature du stockage est donc relative à l'évolution de l'état caractéristique, représenté par l'occupation courante d'une fonction de stockage. Cette évolution représente ainsi l'évolution interne du contenu des emplacements de stockage.

Étant donné qu'il y a toujours évolution d'un contenu, par le dispositif lui-même, en cas de stockage actif et par un dispositif externe, en cas de stockage passif, deux **procédures de base** ont été définies : la procédure "ajouter" et "retirer" une entité.

Ces deux procédures permettent le chargement d'une entité sur un lieu, ainsi que le déchargement, en fonction du type d'accès spécifique au lieu considéré. Ainsi, la position de l'accès, en vue d'un retrait ou d'un ajout, est soit connue implicitement du fait de la structure du lieu (fifo, lifo ou aléatoire), soit précisée explicitement (i,j) dans le cas d'un accès indexé.

Ensuite, la manière d'utiliser ces procédures, par l'intermédiaire de sélecteurs (identificateurs), sera représentative, en partie, de la nature et du type de stockage.

### **I-3-4- Le stockage "passif"**

#### **I-3-4-1- Le stockage de type "simple"**

Cette fonction représente donc les zones de stockage ayant un comportement passif vis à vis de leur chargement/déchargement telles que les stocks rudimentaires. Le contenu de ces stocks est modifié uniquement par l'intermédiaire d'une ressource externe comportant un outil préhenseur (un robot par exemple).

Pour cette fonction, aucun attribut, ni sélecteur, spécifique ou supplémentaire n'est nécessaire pour la caractériser complètement.

#### **I-3-4-2- Le stockage de type "entrée"**

Cette fonction permet de caractériser un stock d'entrée au travers duquel les différents types de produits seront injectés dans le système suivant des lois d'arrivée spécifiques et choisies au préalable en phase de **simulation**.

Pour chaque application, il y aura au moins une source considérée comme point d'entrée au sein de laquelle une **génération automatique** des différents produits sera effectuée suivant **une séquence et une fréquence** particulières.

L'ordre et la fréquence d'entrée des produits dans le système sont deux facteurs déterminant de son évolution. L'apparition d'un blocage, par exemple, résulte généralement de cette séquence d'entrée et son origine relève plutôt de considérations d'ordonnancement que de la notion de vivacité en terme de validation du graphe de contrôle/commande.

C'est pourquoi l'émulation des entrées est un point particulièrement important lors de la validation dynamique, par simulation, du bon fonctionnement du système complet en injectant des produits suivant des séquences et des fréquences différentes.

Actuellement, deux types de séquences ont été envisagés /BOU88a/ :

- la **séquence prédéfinie** : la liste ordonnée des différents produits est construite en phase de spécification et elle correspond à l'occupation initiale du stock d'entrée,

- la **séquence aléatoire** : la liste est effectuée aléatoirement parmi les différents types de produits possibles et, dans ce cas, les différents types correspondent à l'occupation initiale du stock et le choix aléatoire est effectué par l'intermédiaire de la fonction d'accès.

Concernant la fréquence d'entrée, un seul type d'arrivée est envisagé en simulation correspondant à une **arrivée au plus tôt**.

Ensuite en simulation, trois configurations sont possibles :

- **simulation non temporisée avec une séquence d'entrée aléatoire** permettant, d'une part, de mettre en évidence la totalité des points singuliers ou critiques (sources de conflit) et d'élaborer, d'autre part, les règles stratégiques au sein du niveau décisionnel permettant de résoudre ces conflits d'accès,

- **simulation temporisée avec une entrée unitaire et pré-définie**, correspondant à un seul produit de type particulier, qui permet de calculer le temps minimal de conditionnement d'un produit, puisqu'étant seul dans le système, il a accès immédiatement à toutes les ressources,

- **simulation temporisée avec une séquence d'entrée pré-définie** permettant de déterminer, en fonctionnement normal, l'influence de la séquence d'entrée et de détecter d'éventuels cas de blocage, en terme d'évolution du graphe, de type "deadlock" (étreintes fatales) dans le cas de demandes d'accès "entrelacées" à certaines ressources ou d'une saturation du système en terme de capacité.

Il est à noter que la temporisation, en phase de simulation, est prise en compte à travers le modèle de la partie procédé qui est connecté aux graphes de coopération (synchronisation et communication) et aux graphes de configuration (choix et exécution d'une opération) représentés au niveau des gammes opératoires étendues.

Et cette temporisation, représentant les différentes durées opératoires, est intégrée au sein des fonctions opératives qui présentent, bien évidemment, un caractère actif ou mobile (stockage de type actif, mouvement, et traitement). Elle est effectuée par l'intermédiaire de deux méthodes (procédures) qui caractérisent le comportement dynamique d'une classe "objet" représentant une fonction opérative sous la forme <début opération, fin opération>.

Cette forme de représentation est relative à la nature de la simulation du graphe complet qui est de type événementiel par l'intermédiaire d'un échancier.

Chaque événement représente alors soit le début d'une opération, soit la fin d'une opération, et il est estampillé suivant une date d'occurrence et classé de manière à traiter l'occurrence la plus proche au sein de l'échancier.

### **I-3-4-3- Le stockage de type "sortie"**

Cette fonction permet de caractériser le point de sortie où tous les produits finis seront stockés et au sein duquel certaines statistiques seront élaborées.

En effet, pour chaque produit, un ensemble d'informations seront collectées en cours de simulation par l'intermédiaire d'un ensemble d'**attributs définis** au sein de la classe "objet" permettant de caractériser un **type de produit**.

Ces informations, concernant les produits, seront relatives, en particulier, au temps passé sur un lieu physique quelconque et à la date d'entrée sur ce lieu.

En fonction de la nature du lieu, on pourra ainsi calculer, outre le temps de conditionnement total, les temps cumulés et passés sur l'ensemble des zones opératoires (temps de traitement), sur l'ensemble des lieux actifs et/ou mobiles permettant de donner un effet de mouvement à un produit quelconque (temps de transfert) et, enfin, sur l'ensemble des lieux où un simple stockage est effectué (temps d'attente).

Ensuite, à partir de ces informations, on peut établir des statistiques relatives aux équipements de production (taux d'occupation) et aux produits (ratio de productivité).

### I-3-5- Le stockage "actif"

#### I-3-5-1- Le stockage de type "maintien"

##### -a- Description du comportement

Cette fonction caractérise les dispositifs opératifs permettant de maintenir un produit quelconque dans une certaine position spatiale.

Tel est le cas, par exemple, pour les systèmes de préhension (pince, ventouse ...) ainsi que les mors au niveau du mandrin d'un tour, dont la fonction est de tenir le produit pour ensuite lui appliquer un effet particulier (mouvement, traitement ...).

Le comportement, décrit à travers ce type de fonction (procédures), est caractérisé par l'intermédiaire de deux sélecteurs représentant les actions pouvant être réalisées par le système d'actionnement assurant cette fonction. Ces actions représentent les commandes de "saisie" et de "lâchage" d'une entité.

Dans ce cas, l'évolution du contenu de l'emplacement est dynamique et tributaire d'une de ces deux commandes (figure III-1-6). En effet, la commande "saisir" provoquera le chargement (ajout) de l'emplacement et la commande "lâcher" provoquera le déchargement (retrait).

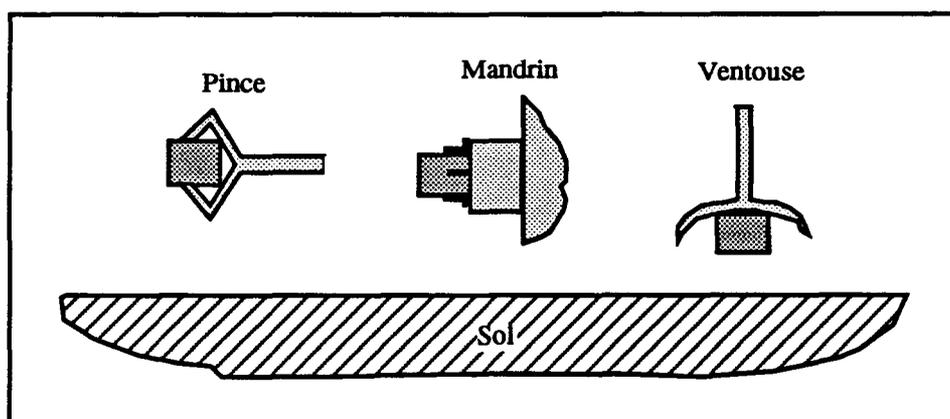


Figure III-1-6 : Dispositifs de maintien

### **-b- Description des caractéristiques**

Un **paramètre de fonctionnement**, relatif à l'aspect actif de la fonction et représentant la **durée opératoire** nécessaire pour réaliser l'une des deux commandes, est à ajouter. Cette durée concerne ainsi le temps nécessaire au système d'actionnement pour réaliser l'opération de **saisie** ou de **lâchage**.

On aura ainsi, par exemple pour un préhenseur, la durée d'ouverture ou de fermeture de la pince pour effectuer le dépôt ou la saisie d'un produit.

De même, une **variable** supplémentaire est nécessaire pour représenter l'**état courant** relatif à l'activité décrite à travers la fonction. L'ensemble des valeurs prises par cette dernière représentent alors les différents états caractéristiques possibles pour un dispositif présentant ce type d'activité en fonctionnement normal.

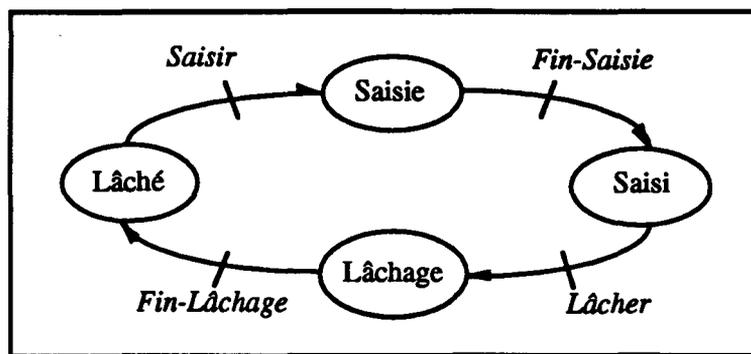
Pour cette fonction, l'état courant pourra prendre deux types de valeurs représentant respectivement un état stable et un état transitoire.

Un état stable représente un état caractéristique de la fonction en question dans lequel le dispositif se trouve lorsqu'il a fini d'exécuter une opération, par l'intermédiaire d'un système d'actionnement, relative à la réalisation de cette fonction. Et un état transitoire représente un état dans lequel le dispositif se trouve lorsqu'il exécute une opération pour atteindre un des objectifs relatifs à cette fonction de "maintien".

Ainsi, nous avons deux valeurs possibles concernant l'état stable, relatif à la fonction, et représentant la position <saisi> ou <lâché> du dispositif ainsi que deux valeurs possibles pour l'état transitoire qui sont <saisie> ou <lâchage>.

Pour résumer, le graphe d'état, schématisé par la figure III-1-7, représente le graphe d'évolution de l'état caractéristique, relatif à l'activité de cette fonction. Sur ce graphe, les actions ou, commandes, ainsi que les événements à partir desquels il y a effectivement une évolution ont été représentés.

En effet, les commandes "saisir" et "lâcher" **provoquent** le passage d'un état stable à un état transitoire et inversement les événements "fin-saisie" et "fin-lâchage" **marquent** le passage d'un état transitoire à un état stable. Ces deux derniers événements sont générés en début de réalisation des deux commandes de telle sorte qu'ils soient pris en compte dès que la durée opératoire correspondante est écoulée.



**Figure III-1-7 :** Graphe d'état d'un dispositif de maintien

Il est à noter que, pour une fonction de maintien, la capacité de stockage est normalement et généralement unitaire, bien qu'on puisse imaginer un dispositif tel qu'un préhenseur élémentaire pouvant maintenir plusieurs produits à la fois. Un autre point est à remarquer portant sur la possibilité de spécifier des durées opératoires pouvant être spécifiques à des types de produits différents d'un point de vue morphologique.

### I-3-5-2- Le stockage de type "serrage"

#### -a- Description du comportement

La fonction de serrage caractérise un **dispositif actif** de type **support** permettant de rendre immobile un produit en le bloquant et donc de le rendre solidaire, momentanément, à ce support actif.

Parmi ces dispositifs, nous pouvons citer les tables d'usinage où les différents plateaux ou, palettes, de bridage sont fixés de manière automatique, par l'intermédiaire d'un système d'actionnement (mâchoires actionnées hydrauliquement), pendant le traitement.

De même pour cette fonction, le comportement (méthodes) est caractérisé par les deux commandes possibles et duales qui sont "**serrer**" et "**desserrer**". Elles correspondent respectivement aux actions de "**serrage**" et de "**desserrage**" d'un produit pouvant être réalisées par le système d'actionnement réalisant cette fonction.

Pour cette catégorie de fonction, l'**aspect actif** du stockage concerne uniquement le **blocage** ou non d'un produit sur l'emplacement correspondant à la possibilité ou non de décharger ce produit de cet emplacement (figure III-1-8).

Donc, à la différence de la fonction de type "maintien", les commandes possibles n'ont aucun effet direct sur l'évolution du contenu de l'emplacement de stockage. Ainsi, la commande "serrer" permettra de rendre solidaire physiquement, sur l'emplacement de stockage, l'entité préalablement chargée par un dispositif externe. Et la commande "desserrer"

ne provoquera pas automatiquement le déchargement de ce produit mais donnera la possibilité à un dispositif externe de l'effectuer.

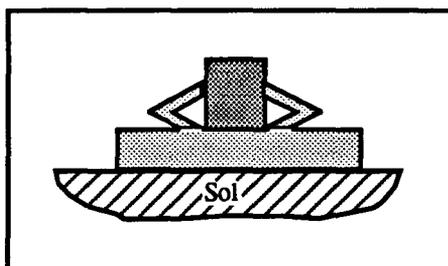


Figure III-1-8 : Dispositif de serrage

#### -b- Description des caractéristiques

La durée opératoire nécessaire pour la réalisation d'un serrage ou d'un desserrage d'un produit représente le seul paramètre supplémentaire de fonctionnement.

De même que pour la fonction "maintien", une variable supplémentaire est nécessaire pour représenter l'état courant relatif à l'activité décrite par la fonction de "serrage".

Les valeurs possibles de cette variable sont analogues à celles représentant les états caractéristiques de la fonction "maintien".

Nous avons ainsi deux états stables correspondant aux positions "serré" et "desserré" du dispositif et deux états transitoires qui sont "serrage" et "desserrage" correspondant à la réalisation des deux commandes (figure III-1-9).

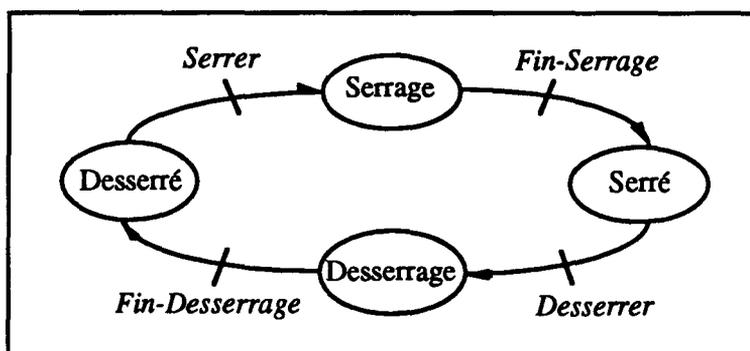


Figure III-1-9 : Graphe d'état d'un dispositif de serrage

Les mêmes remarques concernant la capacité et la durée opératoire spécifique à un type de produit sont valables pour ce type de fonction.

### **I-3-5-3- Le stockage de type “convoyage”**

#### **-a- Description du comportement**

La caractérisation et la représentation du comportement relatives à ce type de fonction ont été effectuées d’après certains travaux concernant la modélisation des systèmes de convoyage /WOI88/ /BOU88b/.

Cette fonction de “convoyage” permet de caractériser différents éléments de base dont certains constituent des dispositifs de convoyage élémentaires, ou dont une certaine composition permet de constituer un réseau de convoyage d’une infrastructure plus ou moins complexe.

Dans le premier cas, ces dispositifs élémentaires peuvent constituer un système de convoyage à part entière, tel qu’une ligne élémentaire de convoyage. Ils peuvent aussi faire partie intégrante d’un système quelconque dont la fonction principale est autre que le convoyage. Tel est le cas, par exemple, pour un système de transport par chariots automoteurs, où chaque chariot est muni d’un tapis roulant pour le chargement et/ou le déchargement de produits.

Dans le second cas, un réseau de convoyage sera défini comme une composition d’éléments de base de convoyage qui ont été définis de telle sorte que l’on puisse spécifier et modéliser des structures quelconques de convoyage.

De ce fait, la décomposition d’un réseau de convoyage n’est pas basée uniquement sur des considérations purement opératives, comme énoncé au chapitre II (Par. III-2-1), permettant une décomposition systématique de toute ressource de production. Ces critères préconisaient une décomposition calquée sur la structure fonctionnelle de la partie opérative.

Une **technique de décomposition** spécifique aux **systèmes de convoyage** dont l’infrastructure est plus ou moins complexe, c’est à dire constituée de dérivations et de jonctions, et dont la partie opérative comporte des systèmes d’actionnement particuliers (aiguilleurs, bloqueurs ...), a été définie. L’unité de décomposition, ou de composition (un seul niveau), représente alors un élément de base de convoyage dont la définition précise est donnée par la suite.

Un **élément de base de convoyage** représente, dans ce contexte, une bande transporteuse unidirectionnelle entraînant par friction une entité quelconque (produit, palette, plateau ...) pour la transférer d’un point significatif à un autre.

Le support permettant de communiquer le mouvement aux entités par friction peut être constitué d’éléments de nature quelconque (rouleaux, bandes, sangles, galets, écailles ...).

Chaque élément représente, alors, soit un **tronçon** (rail) de convoyage ne comportant aucune particularité (convoyage simple), d'un point de vue comportemental, soit une **zone singulière** de convoyage.

Parmi les **zones singulières**, nous avons mis en évidence, d'une part, les **sections** munies d'un système d'actionnement permettant un **arrêt par blocage** des entités transportées par l'intermédiaire d'une butée (bloqueur ou indexeur) et donnant ainsi naissance à des phénomènes d'accumulation.

Ensuite, nous avons les **sections** considérées comme **zones critiques**, c'est à dire les zones constituant un **point de divergence** (bifurcation ou dérivation) au sein du réseau, par l'intermédiaire d'un système d'aiguillage (aiguilleur ou pousseur), et/ou un **point de convergence** (jonction).

Et enfin, nous avons les différentes **zones d'accès** permettant un **chargement** ou un **déchargement** par l'intermédiaire d'un **organe externe** (accessibilité externe), autre qu'un dispositif de convoyage, tel qu'un robot par exemple.

Chaque **zone singulière** aura, par définition et par convention, une **capacité physique unitaire**. Cette convention permet de faciliter la gestion tout en ayant une description correcte et inchangée.

Pour pouvoir représenter ces différents éléments de base qui présentent des comportements spécifiques, trois sous-fonctions de convoyage ont été définies (figure III-1-5) :

- la fonction de type "**convoyage simple**" est relative à une zone de transfert ne présentant aucune particularité, dans un contexte plus large que celui énoncé ci-dessus, c'est à dire que celle-ci sera considérée comme non particulière si elle ne possède aucun système d'actionnement particulier de type "bloqueur" ou "aiguilleur",

- la fonction de type "**convoyage avec blocage**" est relative à une zone de transfert munie d'un système d'arrêt par blocage,

- et la fonction de type "**convoyage avec aiguillage**" est relative à une zone munie d'un système d'aiguillage.

Le comportement général décrit par une fonction de convoyage et relatif à un tronçon de convoyage quelconque, est caractérisé par les deux commandes de base, "**Marche-Transfert**" et "**Arrêt-Transfert**", permettant d'activer celui-ci.

En effet, le comportement d'une zone de convoyage est caractérisé par sa mise en marche permettant le transfert, ou le déplacement, d'une entité et par sa mise en arrêt.

Il est à noter que, dans ce cadre de décomposition, le système d'actionnement (actionneur électrique), permettant l'entraînement par friction, est généralement commun à plusieurs éléments de base constituant un réseau de convoyage.

D'un point de vue opératif, l'association d'un actionneur à plusieurs éléments représente une des deux différences majeures concernant la technique de décomposition d'un système de production (Chap. II) autre qu'un système de convoyage.

L'autre différence concerne l'association d'un seul actionneur à une fonction opérative, de type actif, préconisée par la technique générale de décomposition. En effet, un système d'actionnement supplémentaire et particulier est utilisé pour réaliser les fonctions de convoyage avec blocage (bloqueur) et avec aiguillage (aiguilleur).

Le caractère actif de la fonction de stockage de type convoyage concerne la possibilité de véhiculer et d'évacuer, de manière dynamique, une entité venant d'entrer sur un tronçon de convoyage (ajout) vers une autre zone (retrait) dès que la durée de transfert correspondante est écoulée.

#### -b- Description des caractéristiques

La réalisation de ce type de comportement nécessite trois paramètres supplémentaires de fonctionnement.

-1- La durée de transfert nécessaire à une entité pour parcourir complètement le tronçon en question. Cette durée est relative à la vitesse d'entraînement constante et la longueur du tronçon.

Par convention, nous considérons qu'une entité  $k$  appartient (localisation) à un tronçon  $i$ , si celle-ci s'y trouve complètement et elle appartiendra au tronçon suivant  $i+1$  lorsqu'elle aura quittée complètement le tronçon  $i$ .

Sur la figure III-1-10, l'entité  $k$  appartient au tronçon  $i$  et, bien que l'entité  $k+1$  se situe à la frontière des deux tronçons, celle-ci appartient effectivement au tronçon  $i$ .

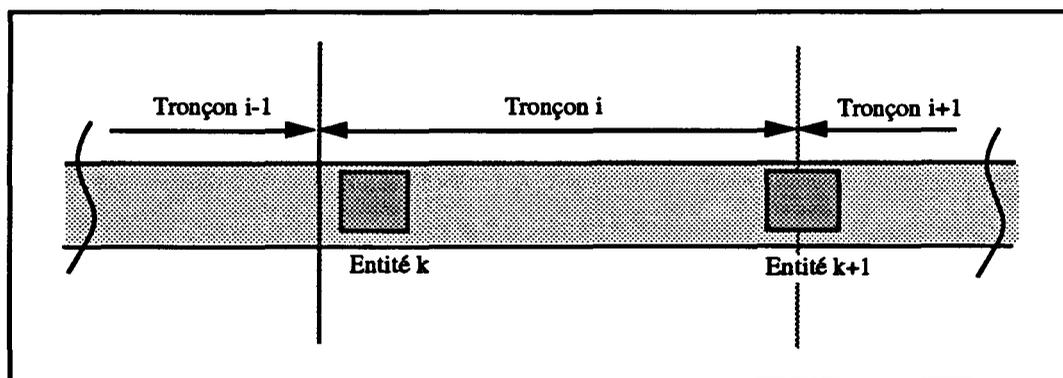


Figure III-1-10 : Localisation des entités

-2- Les différentes **zones de convoyage situées en amont** et directement reliées au tronçon considéré.

-3- Et les différentes zones situées **en aval** et directement reliées, aussi, au tronçon considéré. Les zones situées en aval peuvent représenter des zones de stockage quelconques de type support (passif ou actif).

La fonction de convoyage a été définie de telle sorte que l'on puisse **représenter** des systèmes de convoyage de **structure plus ou moins complexe** par composition de tronçons élémentaires.

Ainsi pour un tronçon élémentaire, on a la possibilité de définir sa nature exacte en spécifiant le ou les tronçons situés en amont et le ou les tronçons situés en aval.

De ce fait, on pourra définir des zones élémentaires de convoyage de nature différente telles que (figure III-1-11) :

- une **zone élémentaire** définie par la connexion **d'au plus une zone amont** et **d'au plus une zone aval**,

- une **zone singulière de type convergence** (jonction) définie par **au moins deux zones amont** et **au plus une zone aval**,

- une **zone singulière de type divergence** (bifurcation) définie par **au plus une zone amont** et **au moins deux zones aval**,

- et enfin une **zone singulière de type convergence et divergence** (module tournant) permettant d'aiguiller des entités en provenance de tronçons différents et à destination d'un autre tronçon parmi plusieurs possibles et définie par **au moins deux zones amont** et **au moins deux zones aval**.

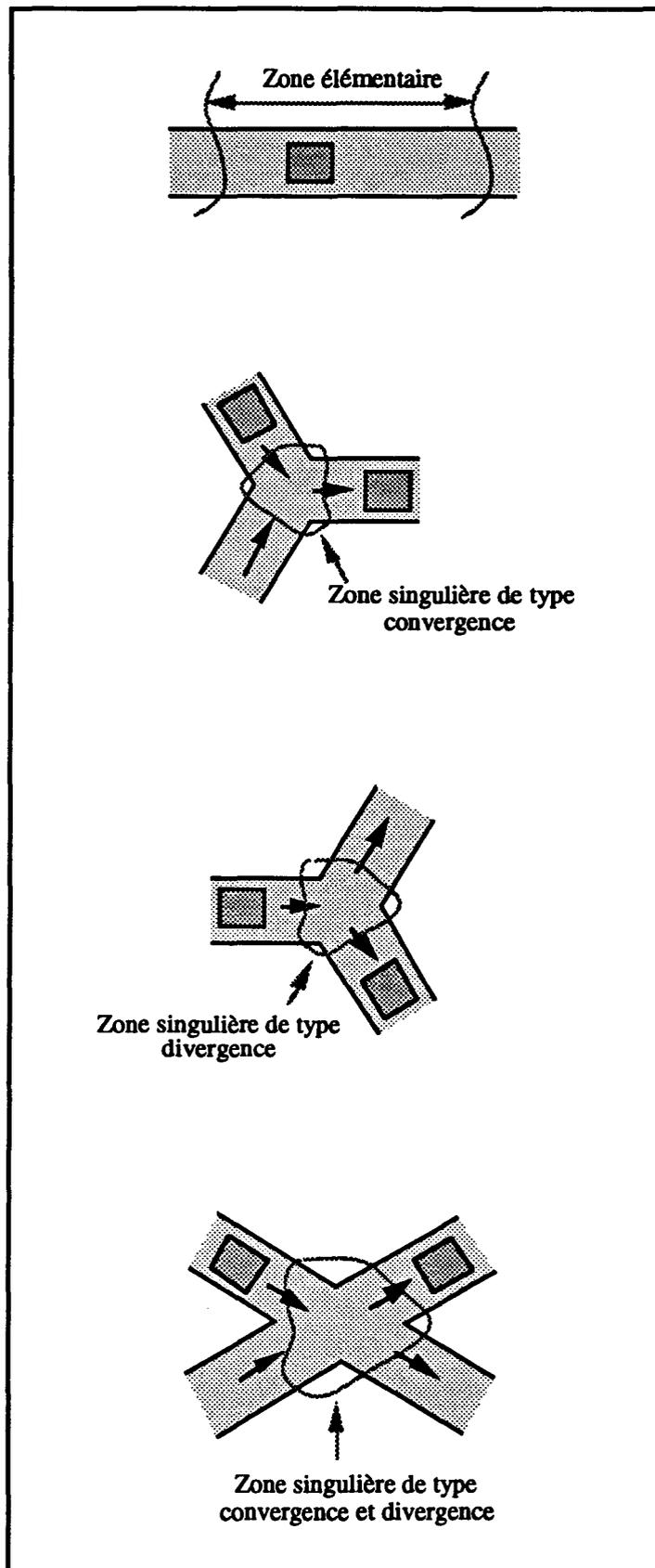


Figure III-1-11: Zones de convoyage élémentaires

De même, la définition de dispositifs ou systèmes complets de convoyage à structure différente sera établie de façon similaire. Nous aurons, ainsi, par exemple (figure III-1-12) :

- une **ligne de convoyage élémentaire** dont la structure est purement linéaire,
- et les **systèmes de convoyage composés** de tronçons élémentaires et dont l'infrastructure globale pourra être plus ou moins complexe.

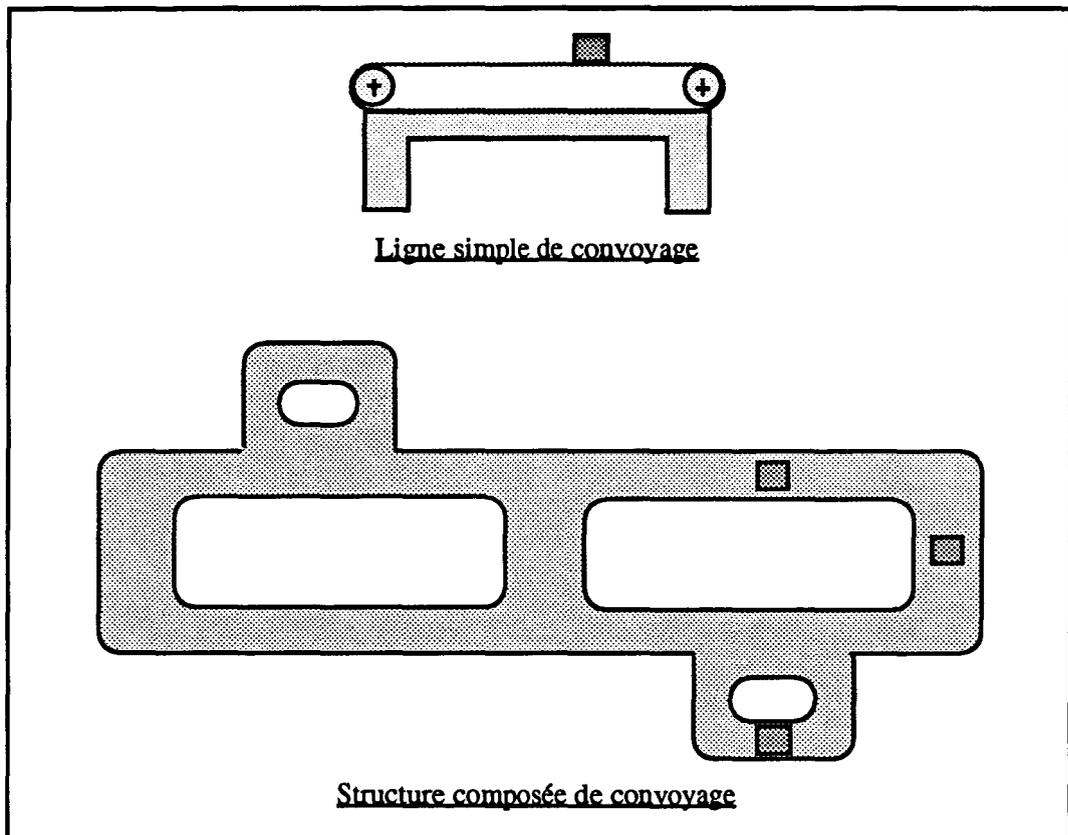


Figure III-1-12 ; Systèmes de convoyage

En fonction du type de convoyage certaines restrictions seront effectuées au niveau du comportement et des valeurs pouvant être affectées à ces caractéristiques communes.

Deux valeurs significatives et duales caractérisent l'état courant, relatif à l'activité (actif ou inactif), d'un dispositif de convoyage de manière générale : "transfert-actif" et "transfert-inactif" (figure III-1-13).

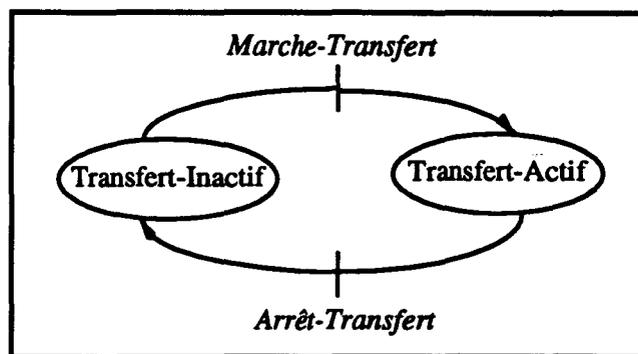


Figure III-1-13: Graphe d'état d'un dispositif de convoyage

Nous allons préciser les caractéristiques supplémentaires permettant une description complète des sous-fonctions de convoyage. La fonction de "convoyage simple" ne nécessite aucune description complémentaire. Cette précision ne concerne que la fonction de "convoyage avec blocage" et la fonction de "convoyage avec aiguillage".

Il est à noter que toute zone comportant une de ces fonctionnalités (bloqueur ou aiguilleur) est considérée comme zone singulière (Par. I-3-5-3) et donc, de ce fait, aura une **capacité physique de stockage unitaire**.

#### **-c- Convoyage avec blocage**

Cette fonction concerne les zones de convoyage munies d'un système d'arrêt par blocage de produits, commandable par l'intermédiaire d'une butée débrayable ou d'un bloqueur quelconque.

Le comportement décrit à travers cette sous-fonction concerne le fonctionnement d'un bloqueur. C'est donc un comportement spécifique qui vient s'ajouter au comportement général d'une fonction de convoyage. Les deux commandes duales et relatives à l'activation d'un dispositif de blocage sont "bloquer" et "débloquer".

Les seules caractéristiques supplémentaires concernent le **paramètre de fonctionnement** relatif à la durée de blocage et de déblocage ainsi qu'une **variable d'état** relative à la position courante du bloqueur, "bloqué" ou "débloqué" pour l'état stable et "blocage" ou "déblocage" pour l'état transitoire (figure III-1-14).

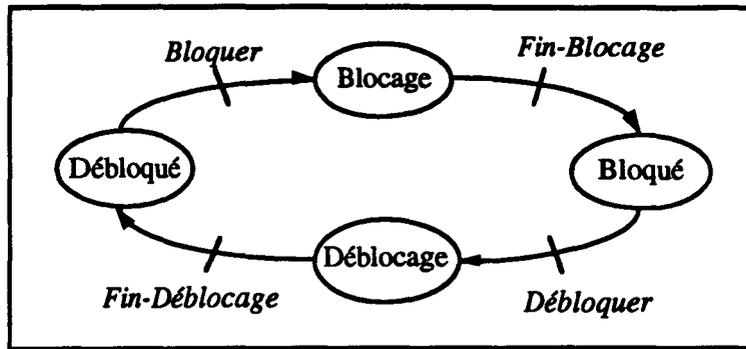


Figure III-1-14 : Graphe d'état d'un dispositif de blocage pour le convoyage

#### -d- Convoyage avec aiguillage

Elle concerne les zones de convoyage munies d'un système d'aiguillage de produits par l'intermédiaire d'un module tournant, d'un poussoir, d'un tireur ou d'un aiguilleur quelconque.

Le comportement décrit concerne le positionnement de l'aiguilleur vers une des zones de convoyage situées en aval de la zone comportant ce dispositif d'aiguillage. Ces zones avals sont celles qui auront été spécifiées à travers un des trois paramètres de fonctionnement général de la zone en question.

Ce comportement est caractérisé par une commande paramétrée de type "aiguiller(zone\_i)" signifiant le positionnement de l'aiguilleur vers la zone\_i située en aval et permettant ainsi de transférer tout produit, passant par l'aiguilleur, vers cette zone\_i.

Les seules caractéristiques supplémentaires concernent le paramètre de fonctionnement relatif à la durée de positionnement ainsi qu'une variable d'état relative à la position courante de l'aiguilleur (figure III-1-15).

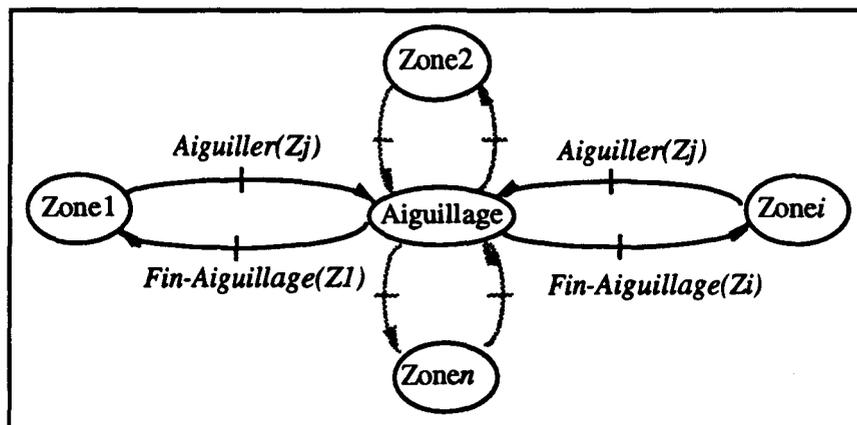


Figure III-1-15 : Graphe d'état d'un dispositif d'aiguillage pour le convoyage

### **I-3-6- Résumé**

La figure III-1-16 permet de résumer l'ensemble des fonctions de type 'stockage' sous forme d'une classification orientée objet. Sur cette figure apparaissent l'ensemble des caractéristiques et le comportement (commandes) de chacune des fonctions.

Une autre représentation de type 'boîte fonctionnelle' /TIX89/ donne une description complète de chacune des fonctions terminales, de façon à obtenir une définition complète et individuelle pour chaque primitive de spécification. Elle est obtenue à partir de la classification orientée objet par l'intermédiaire de la notion d'héritage et suivant l'arborescence fonctionnelle.

Cette notion de boîte fonctionnelle est la notion qui correspond le mieux à celle de CLR /PAN91b/ /ALA86/ et à partir de laquelle une instanciation sera effectuée en phase de prototypage (spécification et modélisation).

Cette phase d'instanciation permettra alors de configurer une primitive de spécification, en lui donnant des valeurs spécifiques aux paramètres de fonctionnement pour la particulariser à l'organe associé en spécification.

La définition fonctionnelle d'un organe correspond alors à une spécification de son type de comportement opératif (type de fonction) et à une configuration de ce comportement en donnant des valeurs particulières aux paramètres de fonctionnement.

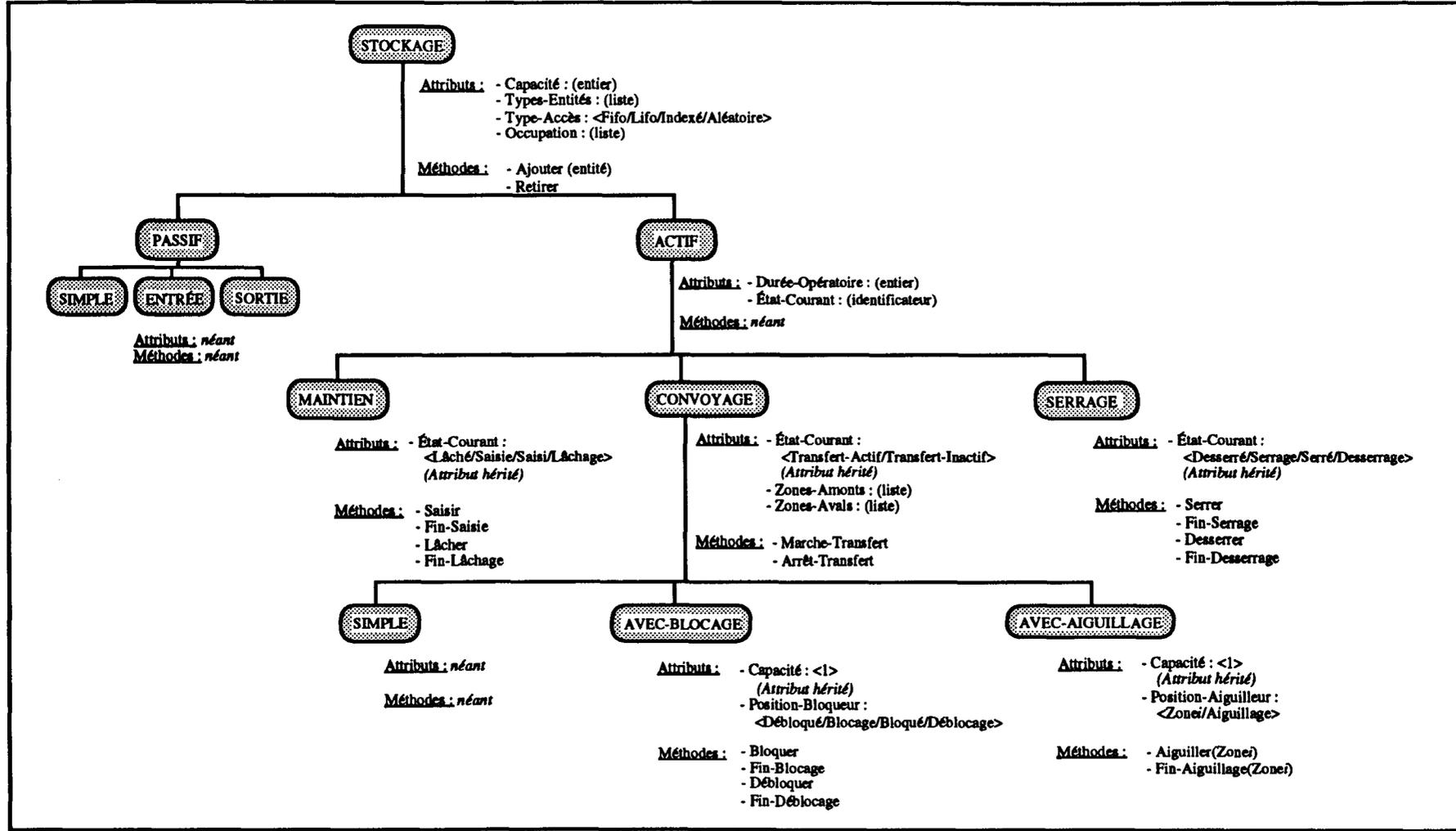


Figure III-1-16 : Classification orientée objet des fonctions de stockage

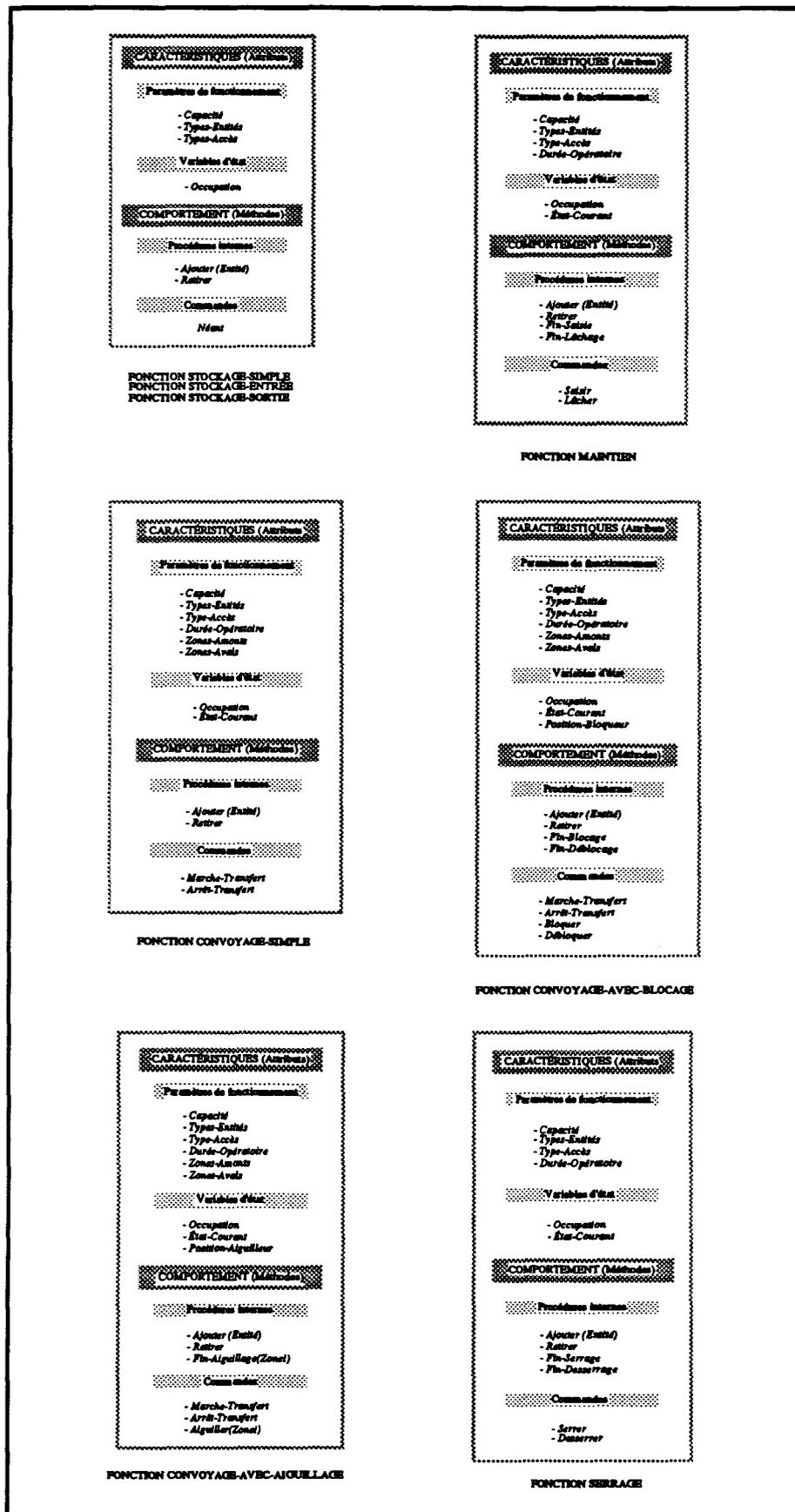


Figure III-1-17 : Primitives fonctionnelles de stockage

## **I-4- Fonctions de type 'Mouvement'**

### **I-4-1- Description du comportement global**

Cette deuxième catégorie de fonctions met en évidence la propriété d'un dispositif mécanique à se mouvoir. Cette propriété est inhérente aux systèmes de positionnement (coulisses, plateaux rotatifs...), de manutention (robot) ou encore de transport (chariots).

Ces dispositifs sont **dotés d'un certain degré de mobilité** et sont **animés d'un certain mouvement spatial** dont l'objectif, commun à toutes les fonctions opératives (actives), est de donner un effet particulier de façon directe ou indirecte à un produit.

L'objectif de tels dispositifs, qui sont obligatoirement supports d'un ou plusieurs lieux caractéristiques, est de transformer ou de **modifier la localisation spatiale (position)** d'un ou plusieurs produits, au sein de l'atelier, en donnant un effet de mouvement aux différents lieux supportés.

Cette fonction s'inscrit ainsi dans le cadre d'un transfert de produit et, en particulier, d'une préparation, pour un produit, d'un **changement de lieu caractéristique**.

Il est à noter que la fonction de convoyage (transfert asynchrone) a été considérée comme un type 'stockage', bien que l'aspect 'transfert' soit souvent privilégié par rapport à l'aspect 'stockage' dans la classification habituelle (système de transport) des systèmes de production.

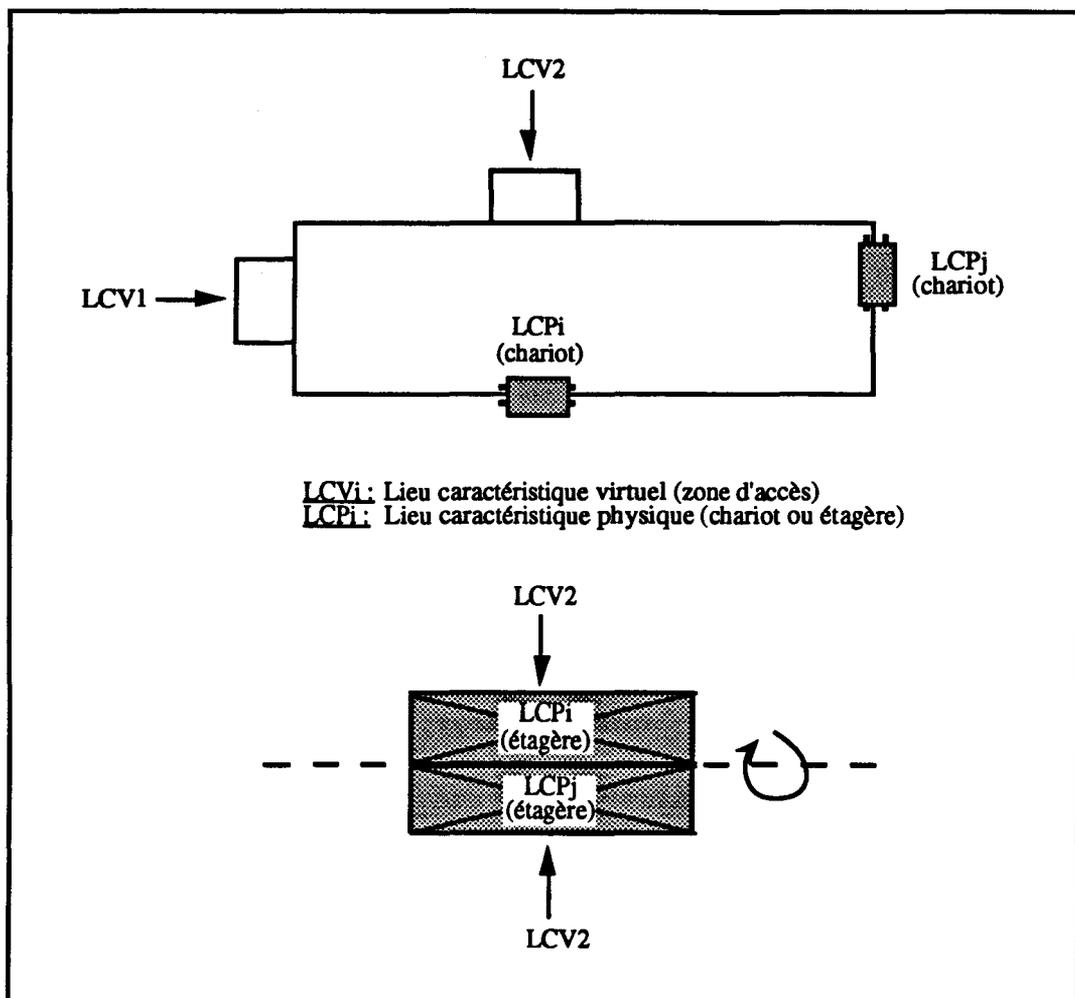
Mais l'analyse comportementale des systèmes de convoyage, effectuée dans les paragraphes précédents, a permis de classer un convoyage parmi les fonctions de type 'stockage'. En effet, un **organe de convoyage** est doté d'une certaine **activité** (stockage actif) mais d'**aucune mobilité** (mouvement).

### **I-4-2- Description des caractéristiques globales**

La fonction de type 'Mouvement' est donc relative aux dispositifs, support de lieux caractéristiques, possédant une certaine mobilité.

Par ailleurs (Chap. II, Par. II-3-3-5), nous avons vu que tout lieu mobile, devant être accédé, est obligatoirement référencé par une ou plusieurs **zones d'accès** (pour le chargement/déchargement) définies en tant que **lieux caractéristiques virtuels**.

Ces différents lieux virtuels font ainsi référence à des lieux physiques, dont la mise en association dynamique est fonction de la position courante du dispositif mobile. Cette représentation a été illustrée au chapitre II sur un exemple concernant des chariots automoteurs et un stockeur rotatif constitué d'étagères (figure II-2-5).



**Figure II-2-5 : Lieux caractéristiques virtuels**

Le nombre de zones d'accès fixes aux différents lieux physiques supportés par un dispositif muni de cette fonction sera le seul paramètre global de fonctionnement et commun à cette catégorie de fonction.

Ensuite, nous aurons comme variables d'état les lieux courants référencés par les différentes zones d'accès. Ainsi, il y aura autant de variables d'état (*Zone\_Accès<sub>i</sub>*) que de zones d'accès.

### **I-4-3- Représentation arborescente**

Une analyse détaillée des dispositifs concernés a permis de mettre en évidence deux catégories de mouvement, d'un point de vue comportemental, ayant pour objectif un positionnement pour l'une et un déplacement pour l'autre (figure III-1-18).

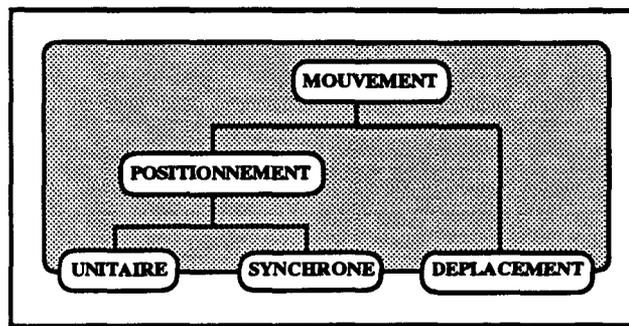


Figure III-1-18 : Représentation arborescente des fonctions de mouvement

-1- Le mouvement de type **'positionnement'** caractérise les dispositifs ayant pour objectif le positionnement d'un ou plusieurs lieux, donc de manière indirecte un ensemble de produits, devant certaines zones d'accès (transport intra-cellules).

Ces dispositifs ont leur base ou support (socle) fixe et solidaire au sol donc, de ce fait, tous les positionnements se font **par rapport à un point fixe**, d'où une certaine restriction au niveau de leur mobilité (robots).

Parmi les différents types de positionnement, nous pouvons distinguer deux sous-types.

Tout d'abord, nous avons ceux qui caractérisent les dispositifs destinés au positionnement d'un seul lieu physique que l'on peut définir comme **'positionnements unitaires'**.

Pour ceux-ci, l'objectif final est de positionner un ou plusieurs produits, appartenant à ce même lieu, vis à vis d'une zone d'accès ou de chargement/déchargement pour effectuer un changement de lieux caractéristiques. Parmi ces dispositifs, nous avons, par exemple, les différents manipulateurs, les coulisses longitudinales et transversales destinés à donner un mouvement au porte-pièce.

Ensuite, nous avons ceux qui caractérisent les dispositifs destinés au positionnement de **plusieurs lieux** de manière synchronisée, que l'on a définis comme **'positionnements synchrones'**.

L'objectif, pour ce type de positionnement, est de faire **passer successivement chacun des lieux** appartenant au dispositif en question devant certaines zones d'accès.

Ces zones d'accès peuvent constituer soit des postes de travail au sein desquels un traitement particulier est effectué sur un produit soit des zones de chargement/déchargement permettant de stocker ou d'évacuer un produit sur un des lieux, tel est le cas pour les chaînes de fabrication automobiles.

Elles peuvent aussi constituer uniquement des zones de chargement/déchargement à un système de stockage, dont la structure est dynamique de sorte à obtenir une certaine économie au niveau de la surface de stockage, et une certaine commodité au niveau de l'accès, tel est le cas pour les stockeurs rotatifs.

**-2- Le mouvement de type 'déplacement'** caractérise les dispositifs présentant une certaine autonomie et un grand degré de liberté au sein de leur mouvement (transport inter-îlots).

Ces dispositifs ne sont **pas solidaires du sol** (autonomie) et ont comme objectif le transport de produits ou de lots de produits au sein de l'atelier suivant un réseau ou une infrastructure préétablie.

Parmi eux, nous avons principalement les dispositifs de type **chariots automoteurs**. Ils sont munis de moteurs à courant continu et d'accumulateurs embarqués /FRO84/ permettant d'effectuer les différents déplacements ou trajets de manière automatique. Le tracé des différents trajets est établi à travers une **infrastructure pré-définie** et implantée au niveau du sols qui leur sert de **guidage**.

Il existe plusieurs systèmes de guidage :

- systèmes opto-guidés par l'intermédiaire d'une ligne peinte ou collée au sol (système photo-électrique),
- systèmes filo-guidés par l'intermédiaire d'un fil conducteur enterré dans le sol (système électro-magnétique),
- et les systèmes guidés par rails fixés au sol.

Les échanges d'informations entre ces systèmes autonomes et le système de commande (marche, arrêt, choix de trajet ...) s'effectuent généralement au niveau de plots de dialogue implantés sur les chariots et au niveau du sol.

Les plots implantés au sol sont situés à des point stratégiques de l'infrastructure de transport tels que les points de convergence ou de divergence, les points de chargement/déchargement ou encore les points de recharge des batteries.

#### **I-4-4- Le mouvement de type "positionnement"**

##### **I-4-4-1- Le positionnement unitaire**

###### **-a- Description du comportement**

Comme énoncé, ci dessus, un dispositif ayant ce type de comportement a pour objectif le positionnement d'un seul lieu par rapport à un ensemble de zones d'accès.

Certains systèmes de positionnement unitaire possèdent un ensemble de sous-organes dont chacun est destiné à effectuer un mouvement élémentaire (translation ou rotation) suivant un axe quelconque.

Nous avons ainsi, par exemple, les différents organes tels que l'avant-bras, le bras et le poignet d'un robot ou les différentes coulisses, transversale et longitudinale, d'un centre d'usinage.

La combinaison de ces mouvements élémentaires permet d'obtenir des mouvements plus ou moins complexes pour positionner l'organe terminal, c'est à dire situé au bout de la chaîne d'action (pince ou porte-pièce) et sur lequel est stocké le produit.

La technique de décomposition définie au chapitre précédent revient alors à considérer chacun de ces sous-organes opératifs, puisqu'ils réalisent un comportement élémentaire (mouvement élémentaire) par l'intermédiaire d'un et un seul actionneur.

La prise en compte individuelle et séparée de chacun de ces sous-organes n'est d'aucune utilité en modélisation puisque l'approche adoptée en conception est une approche orientée produit. Par analogie à la programmation robot, cela revient à adopter une programmation au niveau effecteur (niveau1) et non au niveau articulation (niveau 0) /GAS87/.

De ce fait, l'ensemble des sous-organes constituant un système de positionnement quelconque d'un produit sera considéré dans sa globalité (macro-actionneur) en tant que positionnement global et unitaire.

Le comportement décrit à travers cette fonction sera ainsi caractérisé par la commande de positionnement avec en paramètre la zone destinataire : "**positionner(zone\_i)**". Cette commande représente l'action pouvant être réalisée par le système d'actionnement correspondant (macro-actionneur).

#### **-b- Description des caractéristiques**

Deux paramètres de fonctionnement, spécifiques à ce type de comportement, sont à ajouter :

-1- la liste des différents **trajets** pouvant être effectués, où chaque trajet est défini par deux zones atteignables de nature quelconque (supports ou zones d'accès), origine et destinataire, tout en sachant qu'une zone de repli, qui a été pré-définie (<repos>), peut être utilisée,

-2- la liste des différentes **durées opératoires**, où chaque durée correspond au temps nécessaire pour réaliser un trajet défini préalablement.

Ensuite, une **variable d'état** est nécessaire pour indiquer la **position courante** du système de positionnement.

Si le dispositif en question comporte une ou plusieurs zones d'accès, en fonction de la nature du lieu supporté (accédé), la mise à jour de ces zones d'accès (variables d'état) sera effectuée automatiquement en fin de chaque positionnement de ce lieu vers une zone d'accès donnée (Zone-Accès\_i <- lieu).

Le graphe d'état représenté par la figure suivante permet de résumer la description de cette fonction.

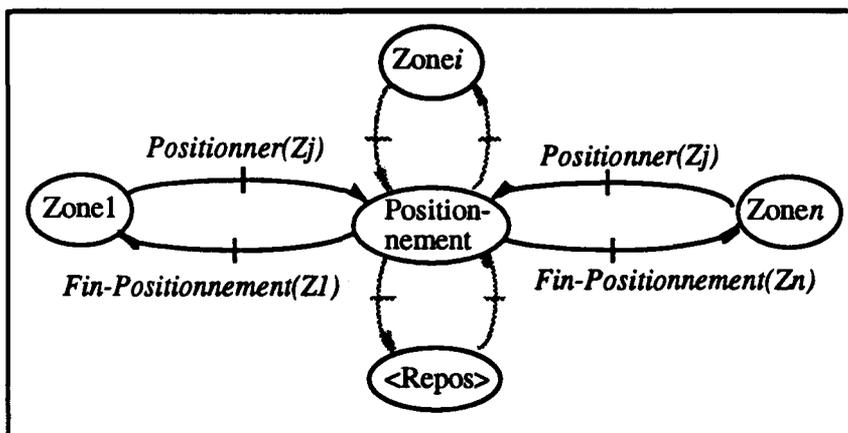


Figure III-1-19 : Graphe d'état d'un dispositif de positionnement unitaire

#### I-4-4-2- Le positionnement synchrone

##### -a- Description du comportement

Cette fonction permet de caractériser les systèmes réalisant des transferts synchrones de produits.

Par transfert synchrone, nous voulons exprimer le fait qu'il existe plusieurs lieux sur ce dispositif et que la mise en marche de celui-ci provoque un déplacement de tous les lieux à la même cadence.

Autrement dit, si l'on prend le cas d'une ligne de transfert synchrone (fabrication automobile), les différents supports ou lieux, sur lesquels seront stockés les produits, ne peuvent pas être arrêtés individuellement, par débrayage (nacelle) ou par blocage (palette).

Donc, au niveau d'une ligne de transfert de ce type, aucun phénomène d'accumulation n'est possible, contrairement au cas d'une fonction de convoyage.

Pour le **positionnement synchrone**, certains équipements fonctionnent en **continu (marche/arrêt)** comme certaines lignes de montage d'équipements d'automobile (habillement) dans lesquelles toutes les tâches d'assemblage sont réalisées exclusivement par des opérateurs humains et sont effectuées sans aucun arrêt de la ligne.

Certaines tâches sont robotisées mais uniquement sur des parties fonctionnant en **discontinu (marche pas à pas)** ou réalisant un transfert asynchrone permettant ainsi d'arrêter momentanément un véhicule.

Considérant que l'objectif, à terme, étant une automatisation ou une robotisation complète des installations de production et qu'une tâche ne peut être réalisée par un système

automatique uniquement si la ligne est à l'arrêt, nous ne représenterons que les transferts de nature discontinue.

Cependant, cette hypothèse n'est pas valable de manière générale. Dans certains domaines particuliers, il existe des traitements (thermiques) effectués au "défilé", c'est à dire sans que la ligne de transfert correspondante soit mise à l'arrêt (transfert et traitement simultanés).

Pour pouvoir prendre en compte de tels systèmes, on peut envisager une représentation d'un transfert continu à partir d'un transfert discontinu équivalent par une paramétrisation judicieuse de ce dernier. Il suffit de se fixer et d'intégrer un temps d'arrêt symbolique au niveau de chaque zone d'accès et pour un produit donné.

Ensuite, pour respecter la cadence de la ligne réelle (transfert continu), on reporte ce temps d'arrêt symbolique sur les durées de transfert inter-zones (voir -b-) de la ligne équivalente (transfert discontinu) de sorte à obtenir une cadence similaire.

Parmi les différents types de systèmes à positionnement synchrone, nous pouvons distinguer les dispositifs à **positionnement linéaire**, tels que les lignes de transfert discontinues et les dispositifs à **positionnement circulaire**, tels que les stockeurs et les plateaux rotatifs (figure III-1-20).

Les différentes actions pouvant être réalisées par le système d'actionnement et permettant un positionnement synchrone seront caractérisées par une commande de positionnement avec, en paramètre, la position à atteindre : "**positionner(Position<sub>i</sub>)**".

Étant donné qu'il y a normalement autant de **positions caractéristiques**, ou de **configurations** (association d'un lieu à une zone d'accès), différentes que de supports à positionner (lieux), le nombre de positions (Position<sub>i</sub>) sera égal au nombre de lieux supportés par le dispositif en question (figure III-1-20).

De ce fait, la position à atteindre correspondra à une configuration caractérisée par une association du type  $\langle \text{Zone-Accès}_i \leftarrow \text{Lieu-Caractéristique}_j \rangle$ .

Le repère physique de chacune des zones d'accès se fait par une numérotation ordonnée (Z<sub>Ai</sub>) en se fixant un sens de parcours.

Et le repère physique de chacun des lieux caractéristiques, via une numérotation ordonnée (LCP<sub>i</sub>), se fait par rapport à une configuration initiale.

Cette configuration initiale est une situation quelconque que l'on se fixe a priori, ensuite, on considère que le lieu situé en face de la zone d'accès numérotée <1> correspondra au lieu dont le repère sera le numéro <1> (Position<sub>1</sub>  $\Leftrightarrow$  Z<sub>A1</sub>  $\leftarrow$  LCP<sub>1</sub>).

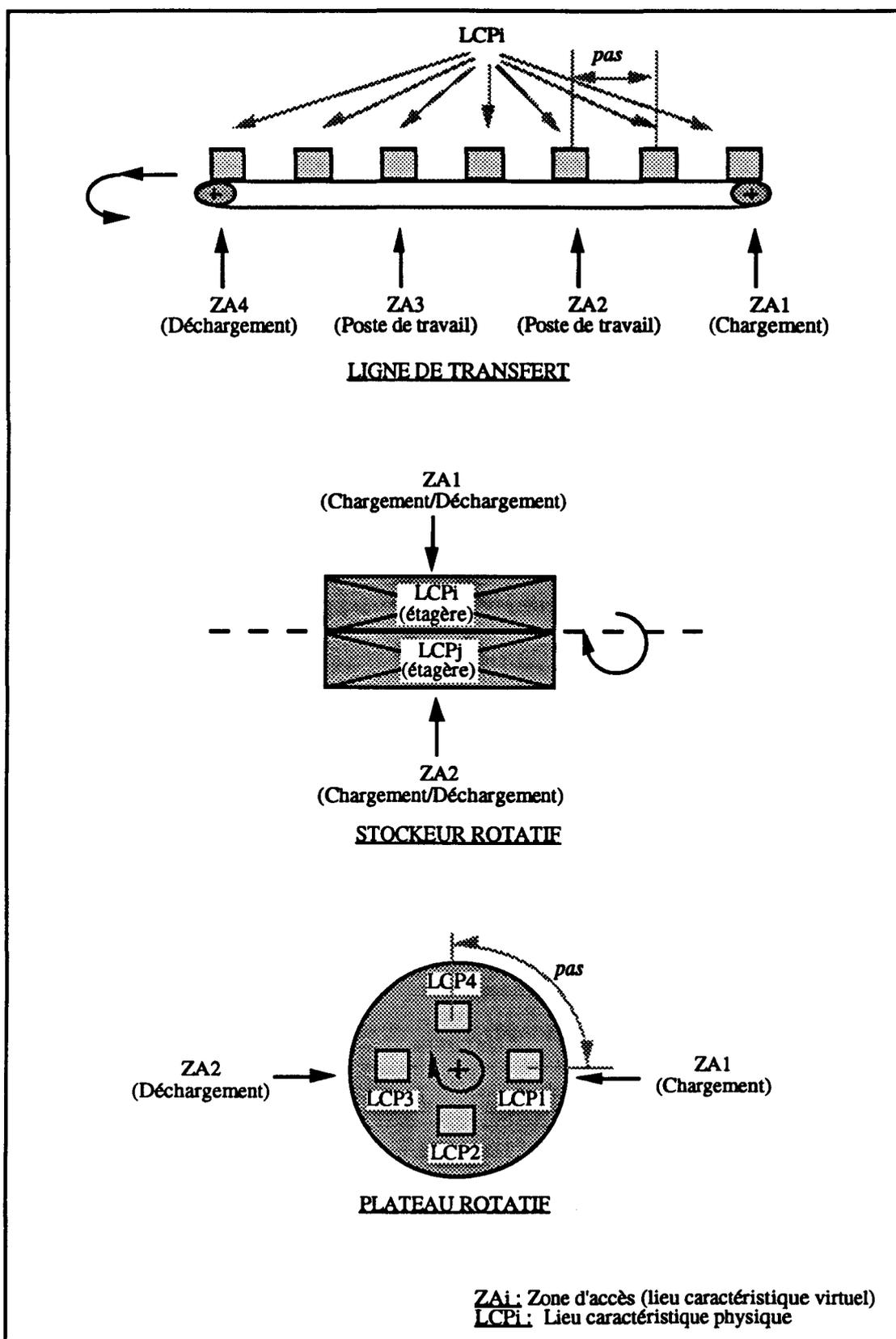


Figure III-1-20 : Dispositifs de positionnement synchrone

L'ampleur du mouvement à réaliser, rotation ou translation élémentaire selon le dispositif, sera fonction de la position courante (i) et de la position à atteindre (j) tout en sachant qu'un seul sens de positionnement est autorisé.

En effet, l'amplitude du mouvement (nombre de pas) devra être connue exactement pour calculer la durée d'un positionnement en fonction de la connaissance du temps unitaire (un pas) nécessaire pour réaliser un positionnement élémentaire (figure III-1-20) :

$$* \text{Nb-Pas} := j-i \quad \text{si } i \leq j,$$

$$* \text{Nb-Pas} := (N-i)+j \quad \text{si } i > j \text{ et avec } N = \text{nombre de lieux caractéristiques.}$$

Et un pas, dans ce contexte, correspond à un mouvement permettant le passage d'une position <i> à une position <i+1> ou le positionnement du lieu suivant devant une zone d'accès donnée.

### -b- Description des caractéristiques

Pour ce type de fonction, deux paramètres supplémentaires de fonctionnement sont nécessaires pour la caractériser complètement.

-1- Le premier correspond à la liste ordonnée des différents **lieux ou supports** physiques que comporte ou supporte le dispositif de positionnement.

Ces supports devront obligatoirement apparaître à un niveau inférieur, en tant que sous-organes, et adjacents au niveau où se trouve le dispositif de positionnement en question, lors de la définition structurelle du système global (figure III-1-21).

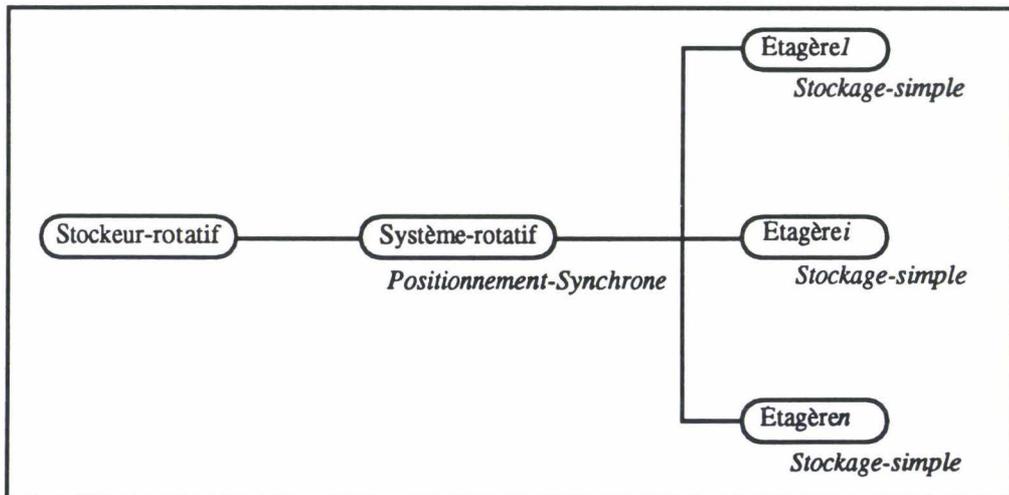


Figure III-1-21 : Description structuro-fonctionnelle du stockeur rotatif

L'ordre de cette liste définit la précedence des supports situés sur le dispositif de positionnement et va permettre la mise à jour des différentes associations entre supports et zones d'accès en fonction de la position courante du dispositif.

-2- Le second est relatif à la **durée opératoire** ou **temps nécessaire** pour accomplir un **positionnement élémentaire** correspondant à un **mouvement d'un pas**.

Enfin une **variable d'état** supplémentaire sera utilisée pour indiquer la **position courante** du dispositif parmi les N configurations possibles.

Il faut noter que l'état d'un tel dispositif est aussi caractérisé par les différents lieux (supports) qui sont référencés, à un instant donné, par les zones d'accès (variables d'état). Ces mises en association correspondent à un changement de position et la mise à jour est provoquée en fin d'exécution d'une commande de positionnement (figure III-1-22).

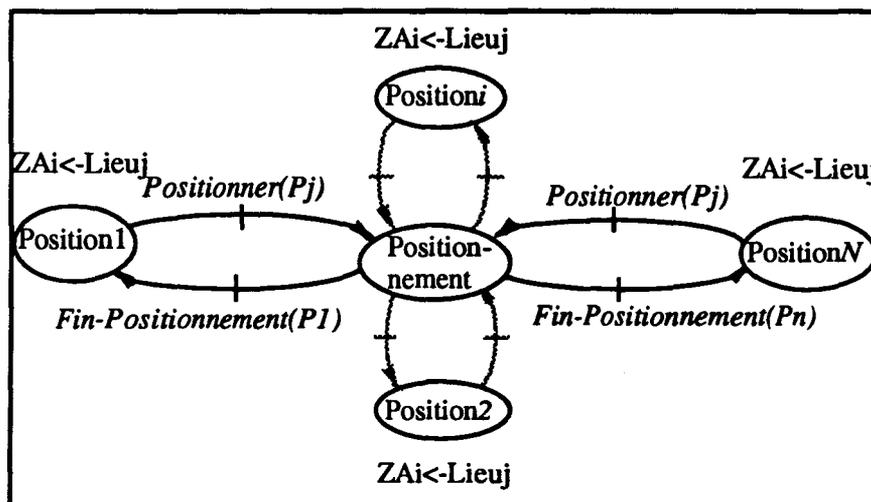


Figure III-1-22 : Graphe d'état d'un dispositif de positionnement synchrone

#### I-4-5- Le mouvement de type "déplacement"

##### I-4-5-1- Description du comportement

Comme énoncé au paragraphe I-4-3, la fonction 'déplacement' permet de représenter un ensemble de dispositifs autonomes (chariots) se déplaçant suivant une infrastructure de transport pré-définie.

Pour des raisons de commodité de description, un réseau de transport constitué de chariots automoteurs, ou équivalent, sera décrit structurellement de la même manière qu'un dispositif de positionnement synchrone (figure III-1-23).

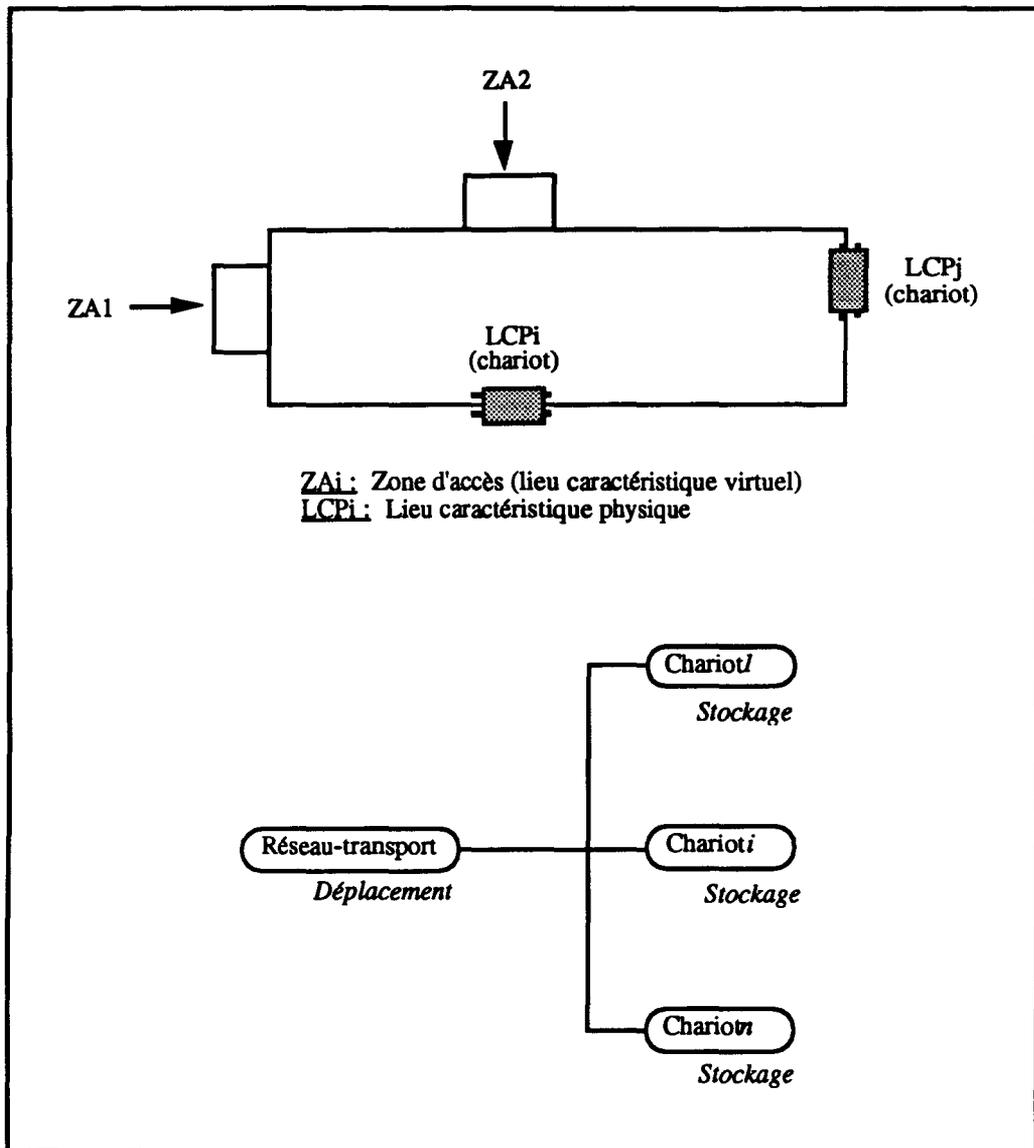


Figure III-1-23 : Description d'un système de transport à chariots automoteurs

En effet, chaque chariot, étant autonome (système d'actionnement), devrait constituer un système à part entière, et comporter sa propre description structuro-fonctionnelle caractérisée par un seul niveau associé aux fonctions de déplacement et de stockage.

De plus, l'infrastructure de transport ne peut être décrite qu'à travers cette fonction de 'déplacement' (trajets). Celle-ci étant commune à l'ensemble des chariots, nous avons préféré adopter une description commune en considérant que ces chariots constituent le système de transport global.

Le degré d'autonomie sera tout de même pris en compte et représenté lors de la description du comportement en donnant la possibilité de commander individuellement les chariots. Ce qui n'altère en aucun cas la description.

Ainsi, pour cette fonction, la seule commande possible correspond à l'action que peut réaliser le système d'actionnement d'un chariot pour effectuer un déplacement avec en paramètre la zone destinataire : "**déplacer(charioti,zonej)**".

Il est à noter que le type de stockage (actif ou passif) concernant la définition fonctionnelle d'un chariot n'a pas été précisé. En effet, certains chariots comportent un tapis roulant permettant le chargement et/ou le déchargement de produits auquel cas, ils seront définies par l'intermédiaire d'une fonction de type 'convoyage' (stockage actif).

Dans le cas contraire, ce sera une fonction de 'stockage simple' donc de type passif.

### **I-4-5-2- Description des caractéristiques**

#### **-a- Les paramètres de fonctionnement**

Les paramètres de fonctionnement portent principalement, pour cette fonction de déplacement, sur la description du réseau de transport.

Et pour que l'on puisse décrire n'importe quel type d'infrastructure, on définit un paramètre particulier permettant de dénombrer les différentes zones dites "**singulières**" (figure III-1-24).

Une zone singulière constitue, dans ce contexte, un **point de transit** de type **convergence** ou **divergence** au sein de l'infrastructure. Ces différentes zones de transit constituent alors les points d'intersection des différents trajets.

Nous aurons ainsi quatre paramètres supplémentaires pour caractériser ce type de mouvement :

-1- le **nombre de zones de transit singulières**,

-2- la **liste des différents tronçons** ou trajets élémentaires constituant le réseau et où chaque tronçon est défini par deux zones, origine et destinataire, dont chacune doit obligatoirement représenter soit une **zone d'accès** soit une **zone singulière** (figure III-1-24),

-3- la **liste des différentes capacités** où chaque capacité correspond au nombre maximal de chariots pouvant séjourner simultanément au sein d'un tronçon tout en sachant que les points d'accès et singuliers ont une capacité unitaire,

-4- la **liste des différentes durées opératoires** où chaque durée correspond au temps nécessaire pour parcourir un tronçon pour les différents chariots.

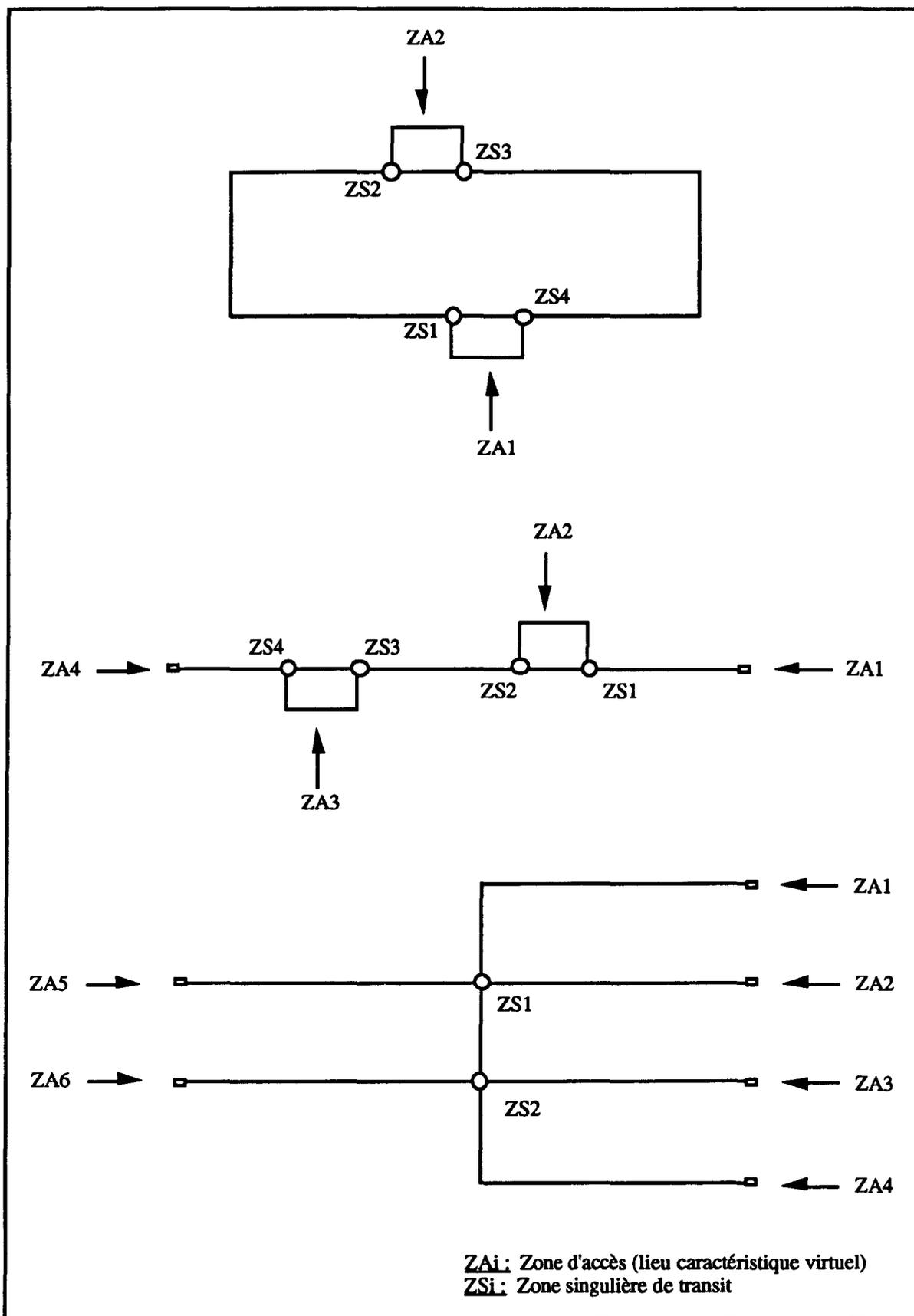


Figure III-1-24 : Différents types de réseau

Le sens utilisé pour décrire les différents trajets n'a aucune importance puisqu'on considère que les chariots peuvent véhiculer dans les deux sens.

Pour obtenir une description correcte d'une infrastructure de transport, aucune zone de type accès ou de nature singulière ne devra figurer au sein de chaque tronçon outre, bien sûr, les points d'origine et de destination.

Il est possible d'intégrer les points de recharge des différentes batteries auquel cas ils seront considérés comme zones singulières au même titre que les points de convergence ou de divergence qui peuvent être assimilés aux points de dialogue (plots).

#### -b- Les variables d'état

L'évolution du comportement étant relatif à chaque chariot, un graphe d'état par chariot sera utilisé.

Ainsi une variable d'état supplémentaire sera utilisée pour indiquer la position courante d'un chariot dont les valeurs sont représentées, ci-dessous, sur le graphe d'état.

Cette variable d'état sera commune à l'ensemble des chariots (Positions-Courantes). Sa valeur sera représentée sous forme d'une liste de couples, de type  $\langle \text{Chariot}, \text{Zone} \rangle$ , indiquant la position courante de chaque chariot.

Enfin l'état général d'un réseau de transport est caractérisé par la présence ou non de chariot devant chaque zone d'accès (variable d'état) et dont la mise à jour est provoquée en fin d'exécution d'une commande de déplacement d'un chariot vers une zone d'accès (figure III-1-25).

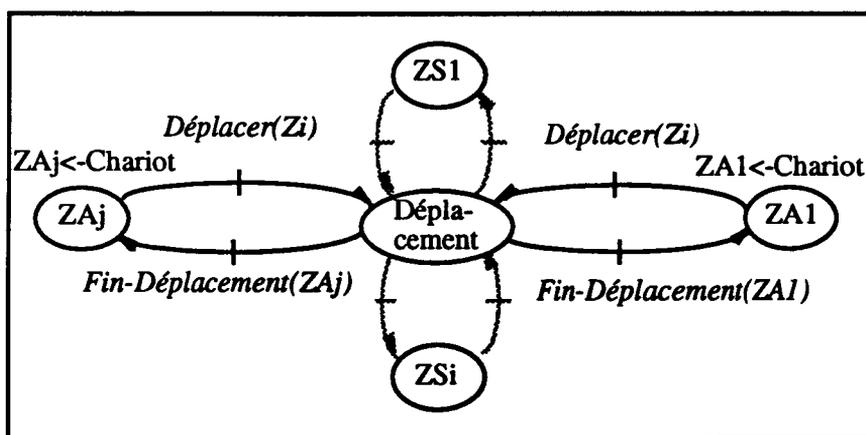


Figure III-1-25 : Graphe d'état d'un chariot

### I-4-6- Résumé

Au même titre que les fonctions de type 'stockage', nous nous proposons de résumer l'ensemble des caractéristiques et des comportements, tout d'abord, à travers une représentation commune sous forme de classification orientée objet (figure III-1-26) et ensuite de manière individuelle sous forme de boîte fonctionnelle (figure III-1-27).

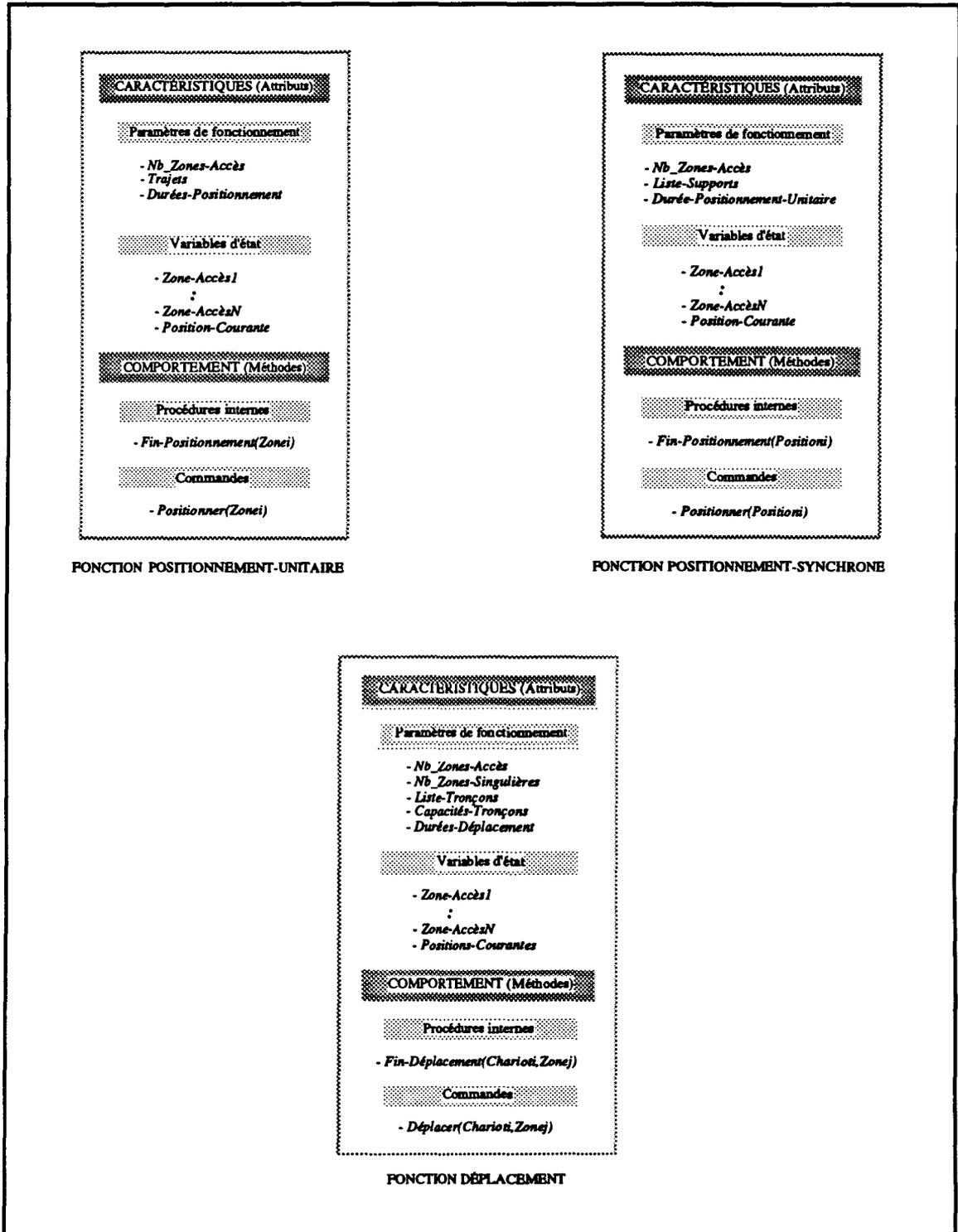


Figure III-1-27 : Primitives fonctionnelles de mouvement

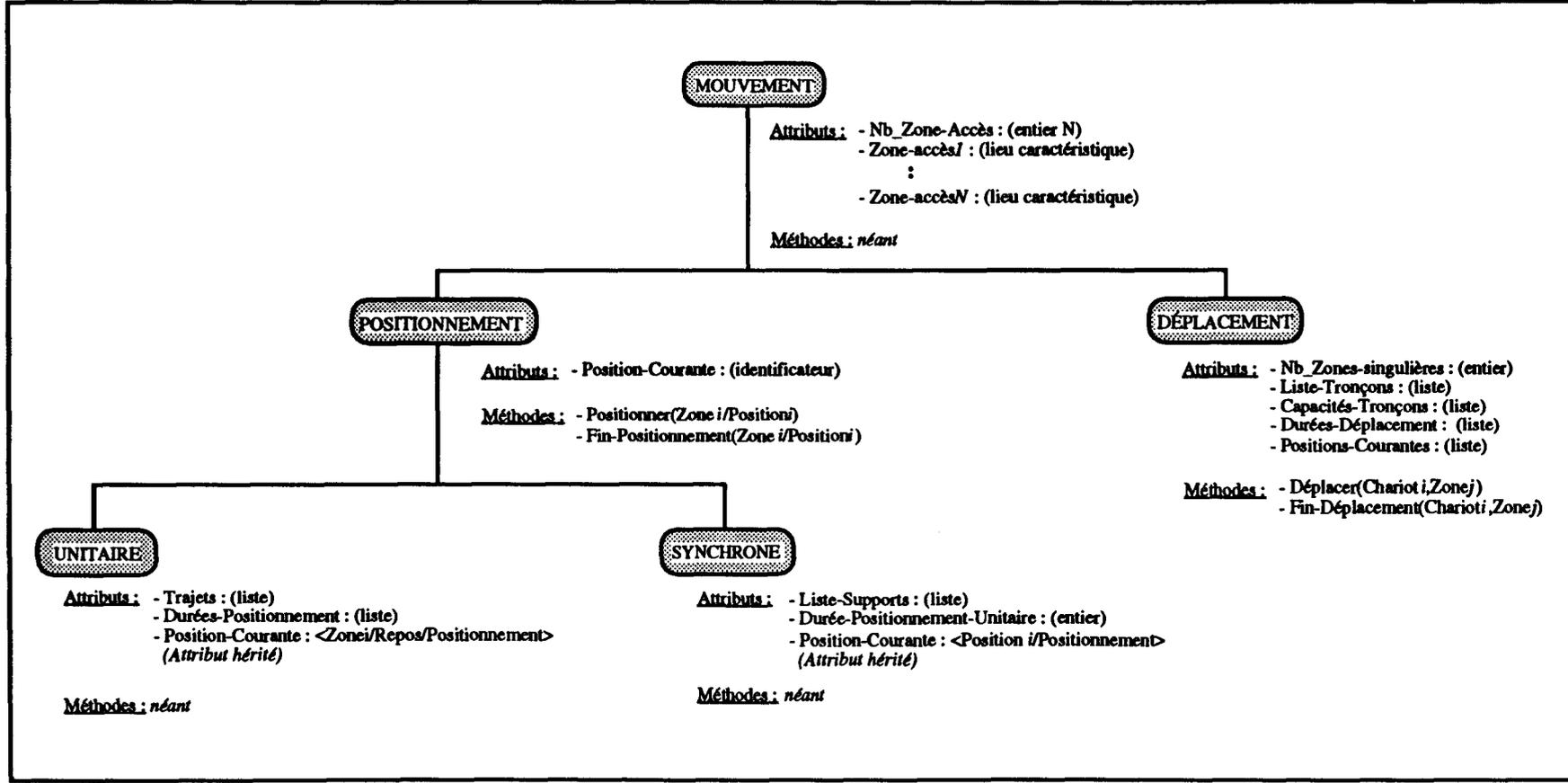


Figure III-1-26 : Classification orientée objet des fonctions de mouvement

## **I-5- Fonctions de type 'Traitement'**

### **I-5-1- Description du comportement global**

Cette dernière catégorie de fonctions permet de caractériser les systèmes ayant la propriété d'effectuer un traitement particulier sur un ou plusieurs produits à la fois.

L'objectif d'un traitement est d'apporter aux produits concernés une modification caractéristique de l'état fonctionnel (transformation fonctionnelle), par opposition à l'état positionnel, par un procédé quelconque (usinage, conditionnement, assemblage ...).

La réalisation d'une telle fonction nécessite plusieurs systèmes d'actionnement, c'est à dire la combinaison de plusieurs fonctions opératives plus élémentaires correspondant aux différents mouvements de l'outil et du produit l'un par rapport à l'autre pour un usinage.

Elle ne respecte donc pas les critères de décomposition, définis précédemment.

En effet, la définition de cette fonction permet de caractériser globalement un traitement à effectuer au niveau d'une zone opératoire sous forme d'une temporisation uniquement (durée opératoire).

Mais ce type de représentation simplifiée répond aux objectifs de conception du système de commande, concernant principalement le système de coordination, énoncés au chapitre II.

Rappelons que l'objectif de la caractérisation de la partie procédé est de modéliser les organes de production de manière adéquate et appropriée au développement et à l'optimisation du système de coordination, de façon à obtenir une gestion optimale des différents flux de produit (Chap. II, Par. II-3-2).

Nous avons ainsi montré qu'il était nécessaire de mettre en évidence les différents lieux caractéristiques intervenant dans le cadre d'un transfert (flux) de produit (figure II-2-3) pour développer correctement les différentes gammes opératoires.

En effet, le système de coordination, défini par l'intermédiaire des gammes opératoires, gère principalement les **changements de lieux** caractéristiques et ensuite le **choix et le lancement d'exécution d'une opération** (mouvements et traitements) sur chacun de ces lieux.

Et ces différentes opérations correspondent aux différents programmes pièces (MOCN) et différents programmes de transfert (robot) pré-définis grâce à des outils de conception adéquats (CFAO, CAO-Robotique).

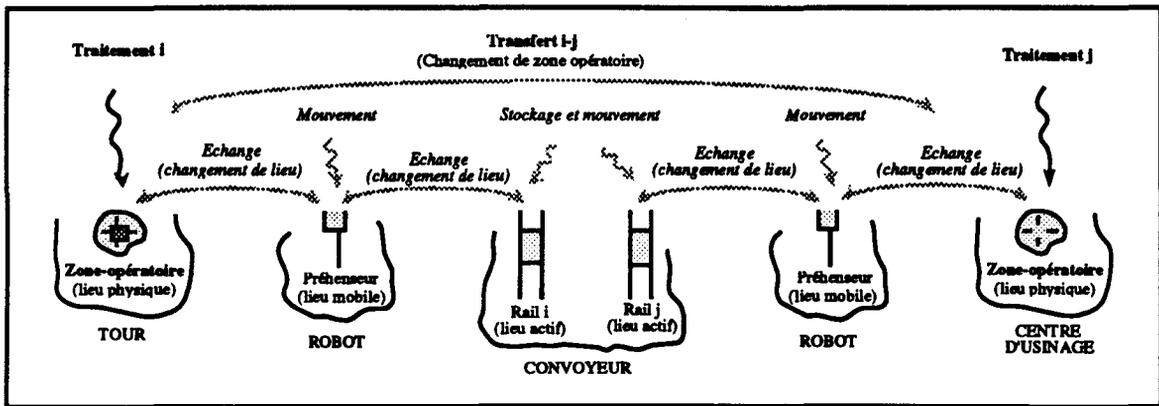


Figure II-2-3 : Transfert entre deux zones opératoires

Notons enfin qu'un système de fabrication quelconque peut être caractérisé à travers trois aspects fonctionnels : **aspect pièce, aspect outil et aspect mesure et sécurité /FRO84/**.

L'aspect pièce est entièrement pris en compte dans notre approche de représentation (porte-pièce et son déplacement) et l'aspect outil pourra être représenté au même titre que ce dernier (pièce) dans le cas d'une gestion précise d'outils (sélection, changement et stockage dans un magasin).

Seul le dernier aspect, et plus particulièrement l'aspect sécurité, n'est pas pris en compte directement. Il est intégré dans la définition de la fonction de traitement sous forme d'une protection d'accès, lors de la réalisation d'un traitement en donnant la possibilité de modéliser ou non le comportement d'un sas de sécurité.

Ainsi, toutes les commandes possibles et permises, dans le cadre d'une fonction de traitement, concernent tout d'abord, le **lancement d'un traitement**, particulier avec en paramètre le type de traitement, et ensuite, la **gestion du sas** de protection (ouverture et fermeture).

### I-5-2- Description des caractéristiques globales

Quatre paramètres de fonctionnement sont nécessaires pour cette fonction de traitement :

- 1- la liste des différents **types de traitement** pouvant être réalisés par le système de fabrication,
- 2- la liste des différentes **durées de traitement**,

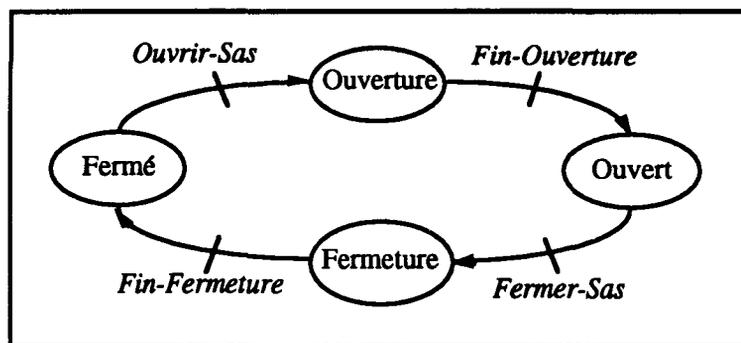
-3- la **zone opératoire** constituant un lieu, où les produits seront effectivement traités, et pouvant être interne au système de fabrication en question (porte-pièce), ou externe, en appartenant à un système différent, tel qu'un robot de soudage travaillant sur une ligne de fabrication automobile,

-4- la **durée opératoire** concernant l'opération d'ouverture ou de fermeture du sas.

Ensuite **deux variables d'état** ont été définies (deux systèmes d'actionnement) puisqu'un traitement est considéré comme une fonction opérative globale (macro-actionneur) et qu'un système de protection d'accès est considéré à travers la commande d'ouverture et de fermeture d'un sas (actionneur simple).

La première concerne ainsi le **traitement en cours** et l'autre porte sur l'**état courant du sas** (ouvert ou fermé).

Seul le graphe d'état concernant la gestion du sas (figure III-1-28) est similaire pour tous les sous-types de traitements qui seront décrits par la suite.



**Figure III-1-28 :** Graphe d'état d'un dispositif de sécurité

Toutes les sous-fonctions de traitement comportent exactement la même description relative au nombre et au type de paramètres de fonctionnement. Seule la nature des valeurs qui seront spécifiées pour le paramètre concernant les types de traitements sera différente.

Chaque type de traitement sera spécifié sous forme d'une association symbolisant une transformation de type :

**Ei ---Ti---> Ef** avec respectivement Ei et Ef l'état initial et final du produit résultant de la modification Ti.

Ensuite, une notation symbolique est utilisée pour représenter l'état courant d'un produit, par l'intermédiaire d'un mot représentant son état d'avancement au sein de la gamme correspondante /BOU88a/ /KAP88/. Et l'évolution de cet état sera symbolisée par la transformation du mot associé.

Cette notation (signature opérationnelle) sera de la forme : <T1+...Ti+...Tn->, où "T" indique le type de traitement et "i" indique un type de modification à réaliser sur un produit et le signe "-" (respectivement "+") indique la non réalisation (respectivement la réalisation) du traitement considéré.

Prenons l'exemple suivant de notation, <t1-f-t2-m->, décrivant l'état brut d'un produit dont la gamme logique est caractérisée par un tournage de type 1 (t1), puis un fraisage (f), ensuite un autre tournage de type 2 et enfin une opération de mesure (m).

### I-5-3- Représentation arborescente

Parmi les traitements effectuant une modification de l'état fonctionnel d'un ou plusieurs produits simultanés, nous distinguons deux types (figure III-1-29).

-1- Les **traitements unaires** agissant uniquement sur un seul produit caractéristique et significatif, c'est à dire ayant été défini au préalable par une gamme logique.

Ces traitements unaires représentent les **transformations effectives** de l'état fonctionnel d'un produit telles que les opérations d'usinage, de conditionnement et de contrôle.

-2- Les **traitements n-aires** qui, par opposition au premier type, mettent en jeu plusieurs produits pour la même opération.

Parmi ceux-ci, nous avons, tout d'abord, les opérations agissant sur un ensemble de produits pour en former qu'un seul à l'issue du traitement, et par un procédé technique quelconque permettant une **agrégation** ou un **assemblage** (soudage, vissage, collage, rivetage ...).

Ensuite, nous avons les opérations duales au premier cas qui, à partir d'un produit unique discret, engendrent plusieurs produits significatifs par **désagrégation** ou **désassemblage** (tronçonnage, découpe laser ...).

Ces traitements (agrégation et désagrégation) sont irréversibles, dans le sens où la modification effectuée est définitive.

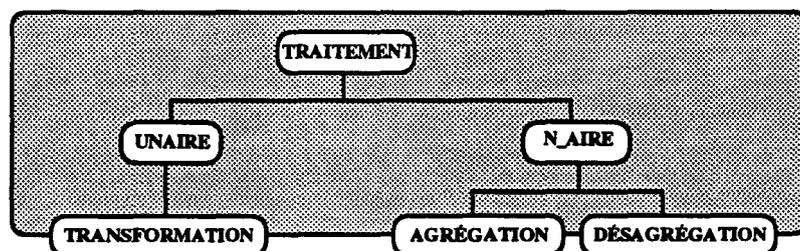


Figure III-1-29 : Représentation arborescente des fonctions de traitement

### I-5-4- Le traitement de type "transformation"

Ce type de traitement peut être symbolisé par la modification fonctionnelle suivante :

$$T1+...Ti-...Tn- \text{ -----} > T1+...Ti+...Tn-$$

Les différents types de traitements seront ainsi spécifiés sous la forme : <État-Initial,État-Final>.

Le graphe d'état, figurant ci-dessous, met en évidence la nature des valeurs pouvant affecter la variable d'état (traitement en cours), ainsi que celle de la commande à appliquer au système.

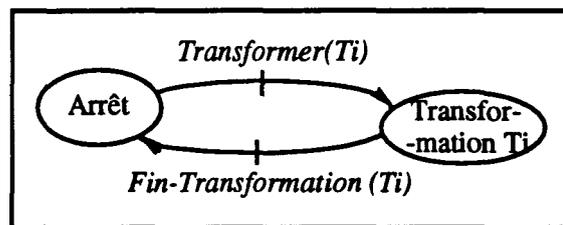


Figure III-1-30 : Graphe d'état d'un système de transformation

### I-5-5- Le traitement n-aire

#### I-5-5-1- Le traitement de type "agrégation"

Une opération d'agrégation peut se schématiser par la modification fonctionnelle suivante :

$P1 (n1) \dots Pi (ni) \dots Pn(n) \text{ -----} > P$  où les <Pi> représentent les produits composants en quantité <ni> et P représente le produit final.

La gamme du nouveau produit, ainsi créé par assemblage, devra bien évidemment être définie au préalable (spécification de la partie logique).

Le graphe d'état d'un système d'assemblage (figure III-1-31) est similaire à celui d'une transformation fonctionnelle.

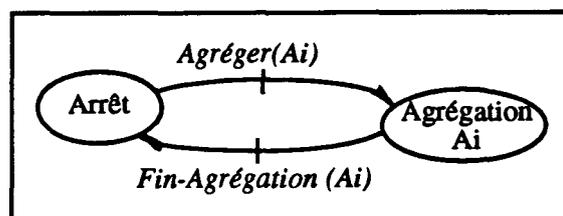


Figure III-1-31 : Graphe d'état d'un système d'agrégation

### I-5-5-2- Le traitement de type "désagrégation"

Une opération de désagrégation peut se schématiser par une modification fonctionnelle duale à celle d'une opération d'agrégation de la manière suivante :

$P \text{ ----> } P_1 (n_1) \dots P_i (n_i) \dots P_n(n)$  où  $P$  représente le produit initial et les  $\langle P_i \rangle$  représentent les produits résultants en quantité  $\langle n_i \rangle$ .

De même, les gammes résultantes et relatives aux nouveaux produits doivent être, bien évidemment, définies au préalable (spécification de la partie logique).

Et de manière équivalente, le graphe d'état (figure III-1-32) aura une structure similaire.

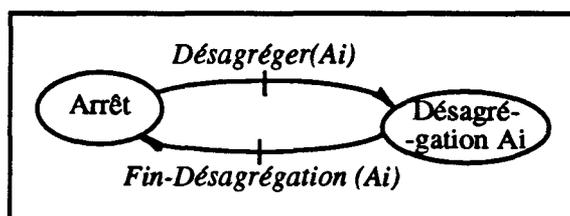


Figure III-1-32 : Graphe d'état d'un système de désagrégation

### I-5-6- Résumé

De même que les deux premières catégories de fonctions (stockage et mouvement), les fonctions de traitement sont résumées à travers deux types de représentation : classification orientée objet (figure III-1-33) et boîtes fonctionnelles (figure III-1-34).

## I-6- Conclusion

Nous avons détaillé, dans cette première partie, les différentes primitives fonctionnelles de spécification à travers, d'une part, le comportement et, d'autre part, les caractéristiques (paramètres de fonctionnement et variables d'état) les définissant.

La description de chacun des **comportements** a permis d'affecter une **sémantique** bien précise à chacune de ces primitives, qui sera utilisée en spécification et, en particulier, en phase de **description structuro-fonctionnelle** d'une ressource.

La description des différentes **caractéristiques** a permis de définir la **nature des différentes valeurs** à affecter à ces dernières pour **configurer** une ressource de production, dont la structure fonctionnelle a été préalablement définie, dans le cadre d'une application bien particulière.

Ces différentes primitives ont, ainsi, été définies dans un souci de généricité (CLR) pour les différentes raisons énoncées dans le chapitre II.

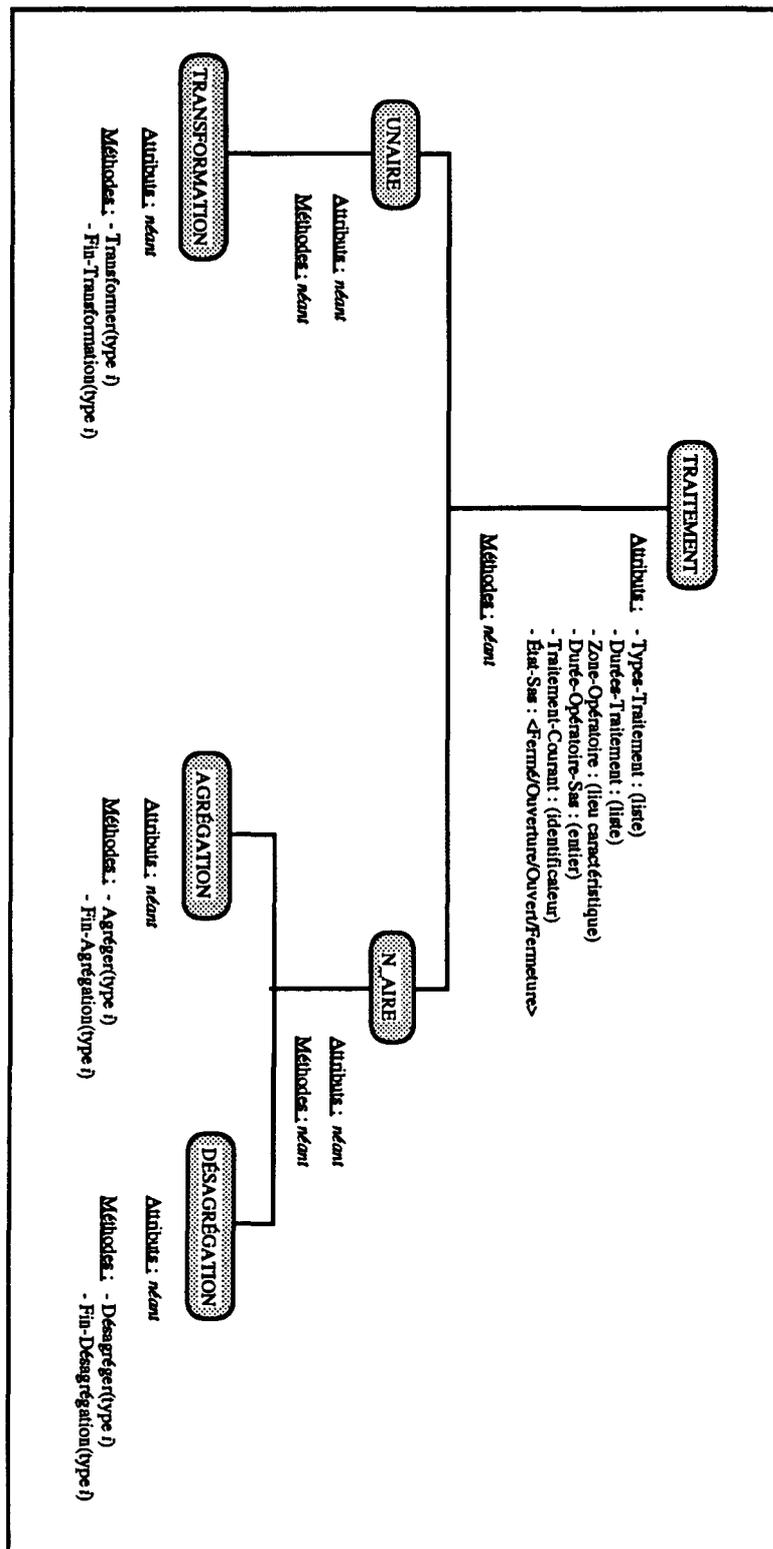


Figure III-1-33 : Classification orientée objet des fonctions de traitement

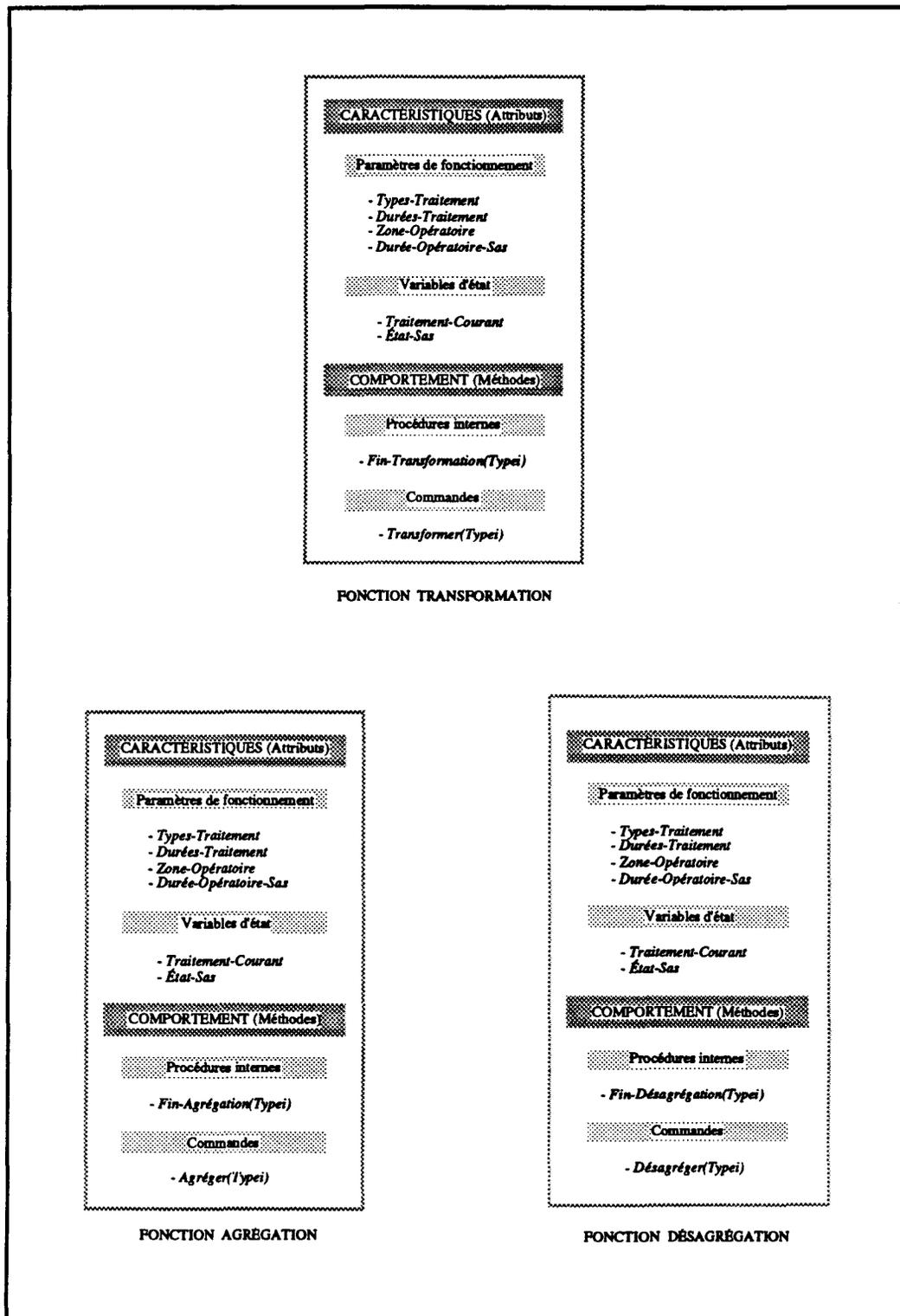


Figure III-1-34 : Primitives fonctionnelles de traitement

Elles permettent, dans un premier temps, d'adopter une approche de type COO en prototypage et d'hériter ainsi de tous les avantages d'une telle approche. D'autre part, ce contexte de définition a permis de dégager les principaux invariants de fonctionnement d'un système de production.

Ces invariants permettent de modéliser, à travers une description structuro-fonctionnelle, une très large variété de dispositifs opératifs. De plus, leur cadre d'utilisation, en tant que primitives de spécification et de modélisation, conduit à un bon **compromis** entre **facilité de description** d'un modèle et **puissance d'expression** du modèle obtenu.

Ce dernier point permet de pallier aux inconvénients d'une approche classique de modélisation par classification orientée objet qui est souvent limitée à un usage répétitif dans un domaine le plus souvent restreint.

Tel est le cas pour les projets **CLAAS /FRI90/**, **AIP /HOL87/** et **OASYS /BEL87/** dont l'objectif est de contribuer au développement d'outils dans le domaine de l'ingénierie productive.

En effet, cette **approche classique** est généralement **orientée 'ressource de production'** suivant une décomposition habituelle d'un système de production (système d'usinage, de manutention, de transport et de stockage) pour obtenir une taxonomie figée du domaine de connaissance considéré. Pour cette approche, chaque classe (concept d'abstraction de base) représente une machine de production spécifique.

Considérant que le phénomène considérable d'évolution et d'explosion technologique, de ces dernières années, ne cesse de donner naissance à des moyens de production de plus en plus sophistiqués et intégrés (multi-fonctions), nous avons préféré nous intéresser à la définition de tels invariants.

Ainsi, ce type d'approche orientée objet nécessite, pour être convenablement exploité, la création de nouvelles classes pour intégrer, à chaque application, les spécificités relatives à des moyens de production non classifiés, c'est à dire présentant de nouvelles fonctionnalités.

L'**approche** de modélisation, présentée dans ce mémoire, est aussi **orientée 'lieu caractéristique'** pour permettre de décrire et d'appréhender correctement toute ressource de production quelle que soit sa structure et quelles que soient ses fonctionnalités.

Pour cette approche, chaque classe représente alors un type de sous-organe ou un type de ressource de production (composition), à part entière, qui est pré-défini par l'utilisateur.

## Partie 2 : DÉMARCHE COMPLÈTE - APPLICATION À UN EXEMPLE

### II - DÉMARCHE COMPLÈTE - APPLICATION À UN EXEMPLE

#### II-1- Outil CASPAIM - implémentation objet

##### II-1-1- Introduction

Un outil mettant en œuvre la démarche de conception, présentée dans ce mémoire, a été développé au sein du laboratoire.

Cet outil n'a pas été développé à des fins commerciales, mais a pour objectif principal la validation des idées avancées à travers cette approche. Il ne supporte, actuellement, que l'étape préliminaire concernant la spécification et la formalisation des objectifs (partie logique) et des moyens (partie physique) de production.

Nous avons vu que notre approche de spécification permettait de décrire facilement la partie logique et physique d'un système de production, tout en ayant une finesse de représentation adéquate au développement et à la simulation.

Cette efficacité provient essentiellement des concepts définis, notamment, dans un souci de réutilisabilité. Elle atteint d'autant plus son efficacité optimale, si l'environnement informatique de spécification offre une approche orientée objet permettant d'implémenter des mécanismes de réutilisabilité.

L'objectif est de donner la possibilité de définir, d'archiver au sein d'une bibliothèque et d'exploiter des modules réutilisables.

De même, cet environnement doit offrir une interface de type graphique. Elle permet d'accélérer la construction d'un prototype de par la convivialité qu'offrent, en général, les outils graphiques, lorsque ceux-ci sont effectivement bien conçus /CHO88/.

L'environnement LeLisp, développé par l'INRIA, sur VAX/VMS a été choisi pour cette mise en œuvre.

En effet, le langage LeLisp possède une couche orientée objet minimale (MicroCeyx) basée sur le modèle Ceyx, permettant une hiérarchie conceptuelle de classes par la relation de spécialisation réduite au monohéritage.

De plus, il existe un générateur multi-fenêtrages (XWindow) d'interfaces graphiques appelé AÏDA et commercialisé par ILOG. Il est défini en tant que sur-couche LeLisp et utilise la programmation orientée objet de LeLisp.

Par contre, la couche objet LeLisp de base n'offre pas la possibilité de définir et de gérer une hiérarchie structurelle par une relation de composition.

De ce fait, cette couche a été enrichie, d'une part, par la définition d'une "métaclasse <Classe>" permettant de répertorier les instances et les sous-classes d'une classe. Ensuite, la notion de variables de classe (<composants> et <fonctions>) a été implémentée pour pouvoir définir des hiérarchies structurelles et, en particulier, pour pouvoir effectuer une description structurelle et fonctionnelle d'un type de ressource de production (prototype).

### **II-1-2- Fonctionnalités de l'outil**

Cet outil, dont la structure d'accueil est représentée sur la figure III-2-1, a pour but de supporter et d'appliquer entièrement la méthode CASPAIM. Il comporte, ainsi, une **partie gestion** permettant d'éditer, d'ajouter, de supprimer, de charger et de sauvegarder une application particulière au sein de la base.

Chaque application est définie par une association formée d'un système logique et d'un système physique (figure III-2-1). Chacun de ces systèmes est défini et géré indépendamment par l'intermédiaire de la **partie description** de l'outil.

Cette partie permet de lancer respectivement un éditeur de gammes (figure III-2-3), pour la gestion de la partie logique, et un éditeur élaboré de ressources de production, pour la gestion de la partie physique, dont les différentes fenêtres d'édition sont représentées dans le paragraphe II-4.

Enfin, la **partie exploitation** permettra ultérieurement de développer les gammes opératoires étendues représentant le système complet de commande, ou de coordination, et d'en faire une validation par simulation.

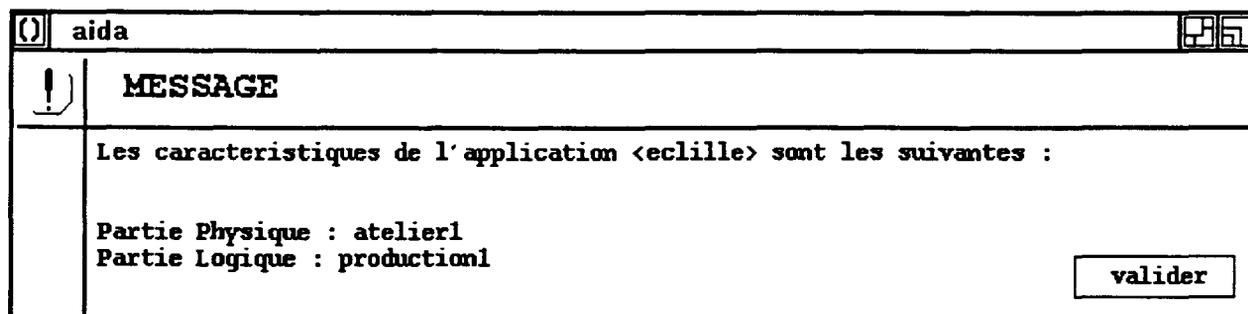
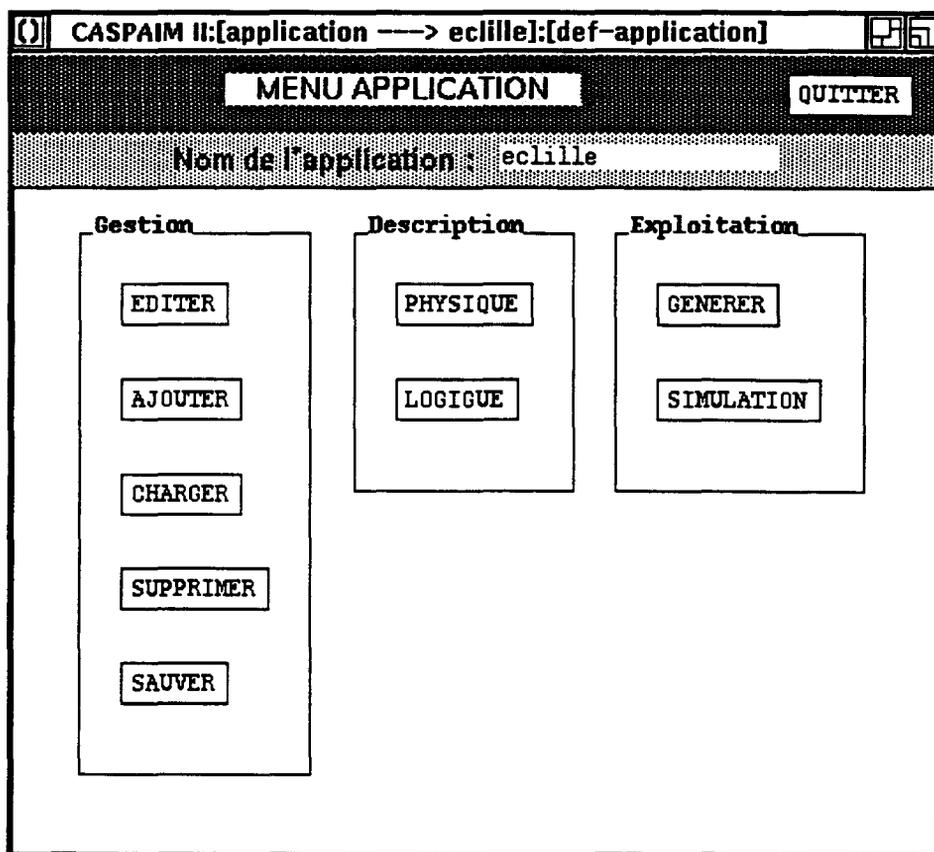


Figure III-2-1 : Fenêtre d'accueil

## II-2- Présentation de l'exemple

L'exemple, schématisé ci-dessous (figure III-2-2), représente l'architecture de l'atelier flexible, dans sa première version, implanté à l'École Centrale de Lille.

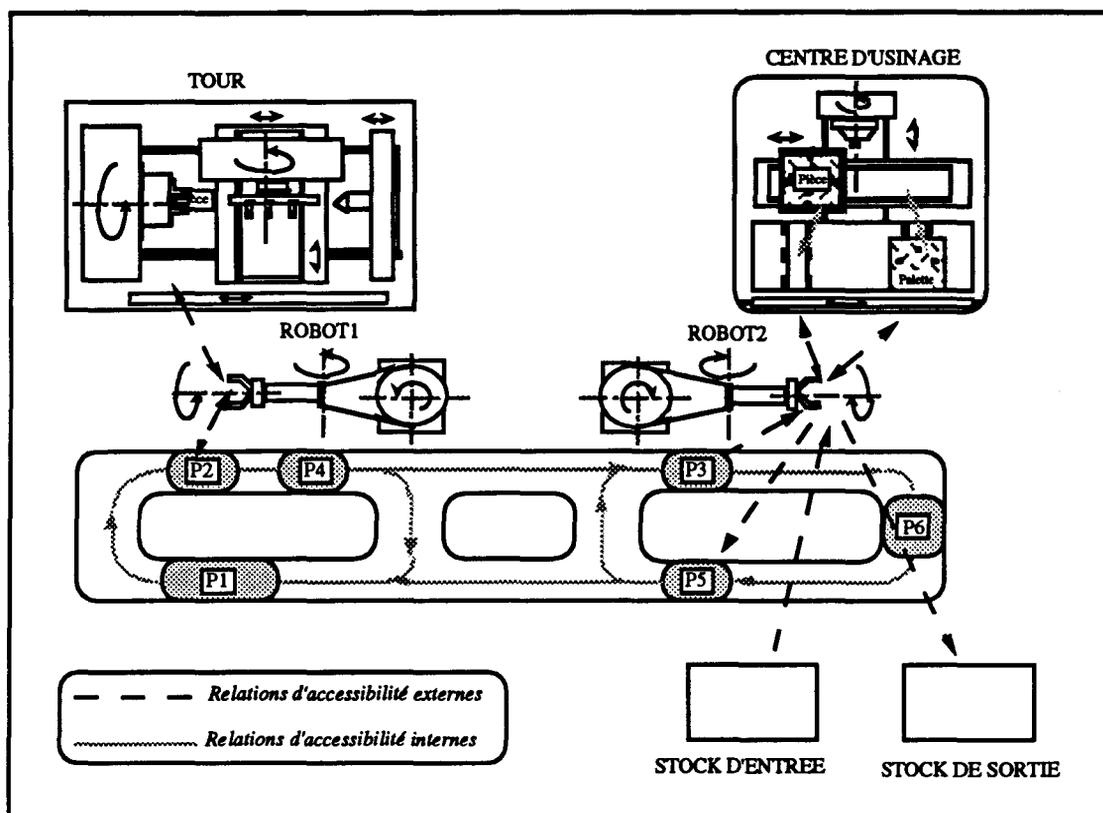


Figure III-2-2 : Présentation de l'atelier

## II-3- Description de la partie logique

Dans cet atelier, plusieurs types de pièces sont usinés. Seuls deux d'entre eux seront traités dans cet exemple (figure III-2-3). Les opérations décrivant leur processus de fabrication sont les suivantes :

- un tournage, uniquement, sur le tour pour le premier type,
- un tournage, sur le tour, et un fraisage sur le centre d'usinage, dans n'importe quel ordre, pour le second type.

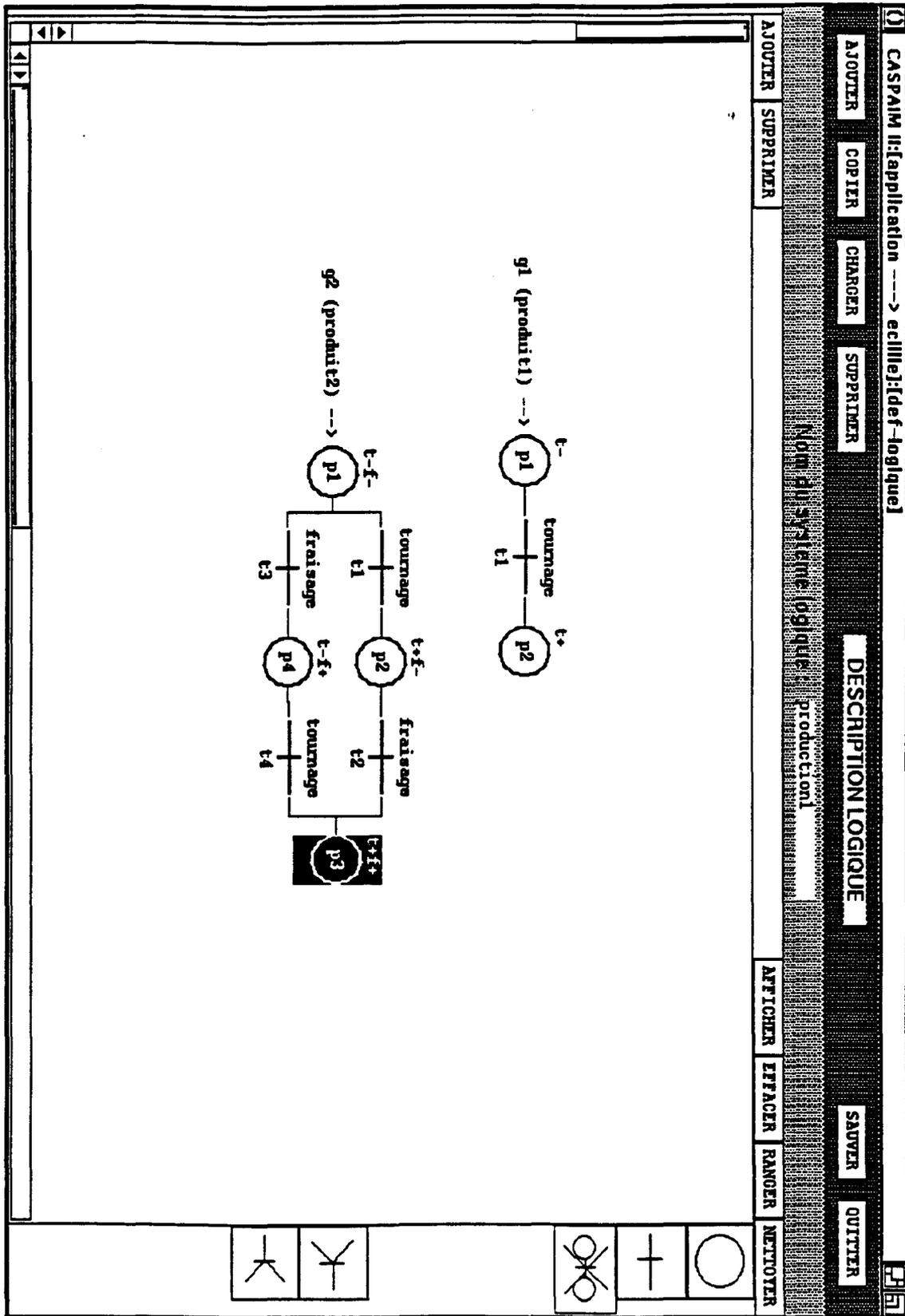


Figure III-2-3 : Édition des gammes logiques

## **II-4- Description de la partie physique**

La description de la partie physique (figure III-2-4) correspond, d'une part, à la définition des prototypes à partir desquels les ressources, constituant l'application, seront générées et définies.

La définition des prototypes (figure III-2-5) consiste à décrire la structure fonctionnelle de la partie opérative des différentes ressources (classes) de l'application qui n'ont pas été préalablement archivées, au sein de la bibliothèque de prototypes pré-définis, à travers une autre application.

Ensuite, ces prototypes sont particularisés (figure III-2-6) en générant, tout d'abord, des représentants (instanciation) pour l'application en question et, ensuite, en donnant des valeurs spécifiques aux différents paramètres de fonctionnement définissant chacun de ces représentants.

La description structuro-fonctionnelle des différents types de moyens de production, qui constituent l'atelier en question, aboutit au modèle arborescent représenté par la figure III-2-7. Sur cette figure, le prototype du convoyeur n'a pas été représenté.

En effet, il est représenté sur une figure annexe (figure III-2-8), dans laquelle une description topologique a été ajoutée pour clarifier la démarche de description structuro-fonctionnelle concernant un système de convoyage.

Les lieux caractéristiques sont mis en évidence sur un modèle de description arborescent comportant deux niveaux au maximum (figure III-2-9). Pour chaque moyen, seuls les lieux caractéristiques y sont représentés associés à leur fonction et aux supports (organes terminaux) avec lesquels ils sont en relation externe.

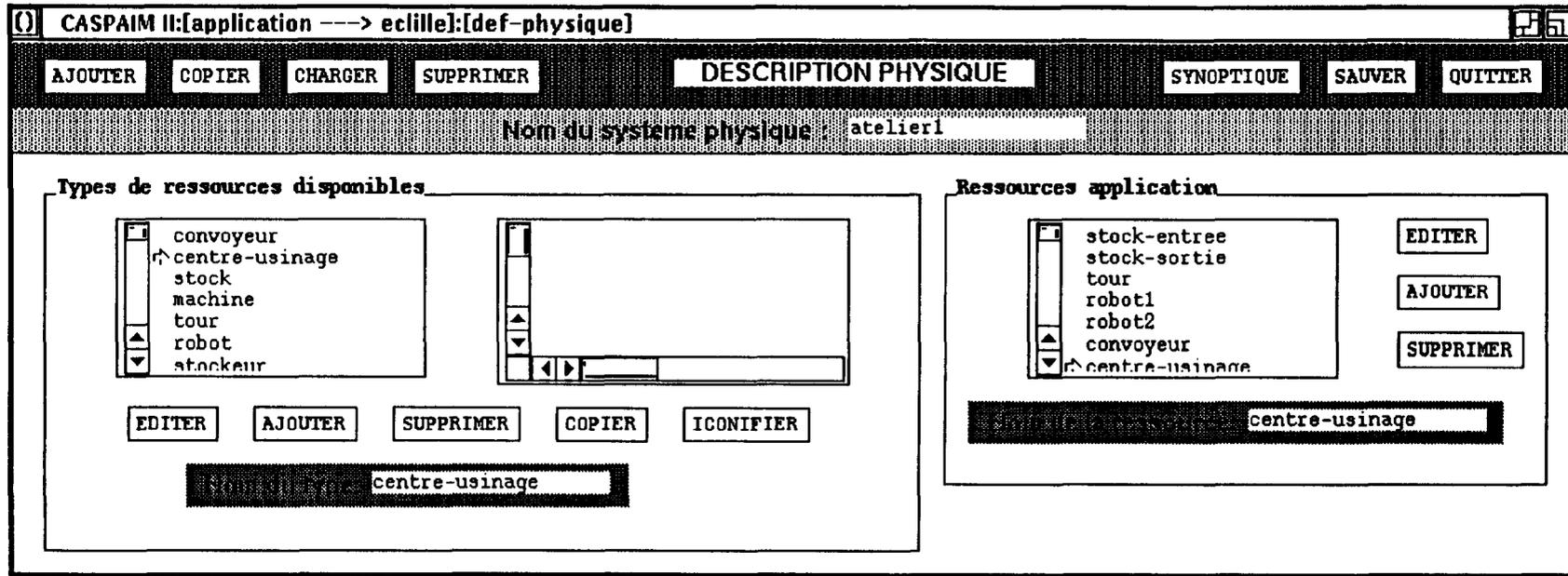


Figure III-2-4 : Fenêtre d'édition d'un système physique

CASPAIN II:[application ----> eclille]:[def-prototype]

EDITER DESCRIPTION PROTOTYPE QUITTER

Nom du prototype: centre-usinage

**Définition structurelle**

- centre-usinage
  - tampon-e/s1
  - poste-operatoire
  - positionneur - zone-transfert
  - tampon-e/s2

AJOUTER SUPPRIMER RANGER

**Définition fonctionnelle**

- ↑ maintenance

AJOUTER SUPPRIMER

maintenance

zone-transfert

**Primitives fonctionnelles**

- Stockage
  - Actif
    - Maintien
    - Serrage
    - Convoyage
      - Conv\_Aiguillage
      - Conv\_Blocage
      - Conv\_Simple
  - Passif
    - Sto\_Entree
    - Sto\_Sortie
    - Sto\_Simple

Sélection type

- ↑ Stockage
- Mouvement
- Traitement

Stockage

Maintenance

AFFICHER RANGER

Figure III-2-5 : Fenêtre d'édition des prototypes

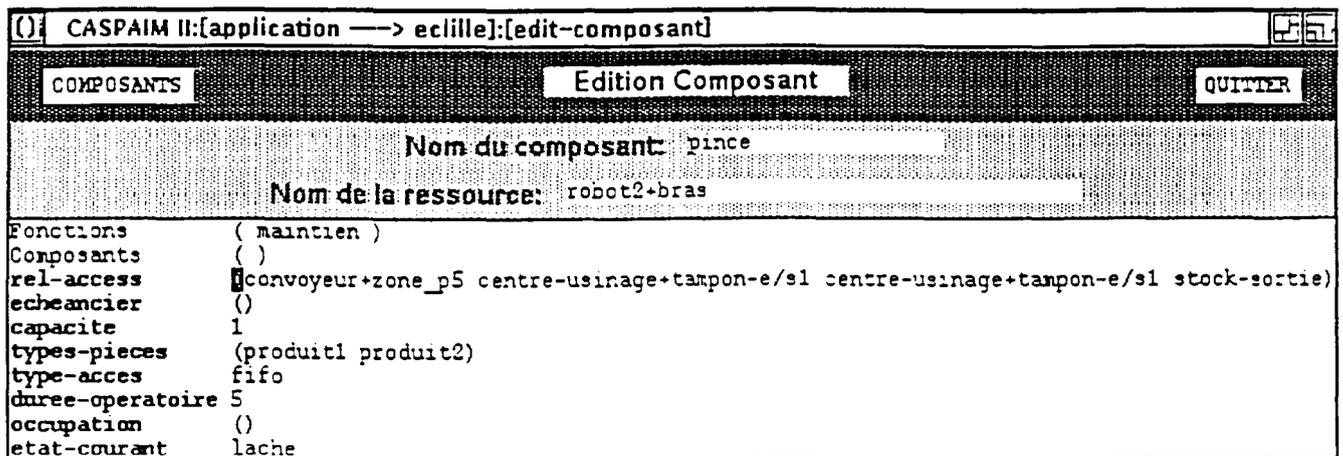
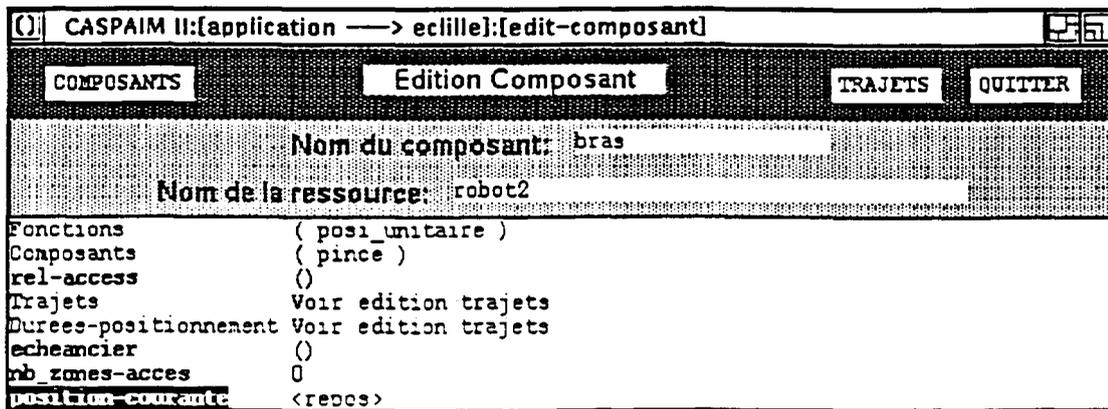
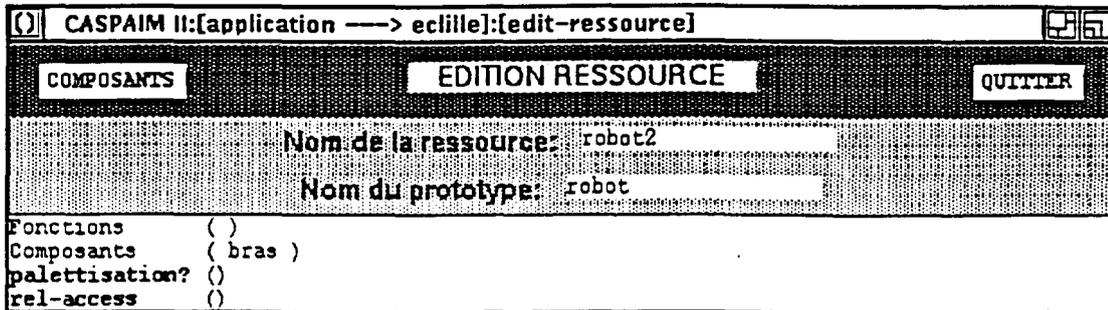


Figure III-2-6a : Fenêtres d'édition des ressources d'application

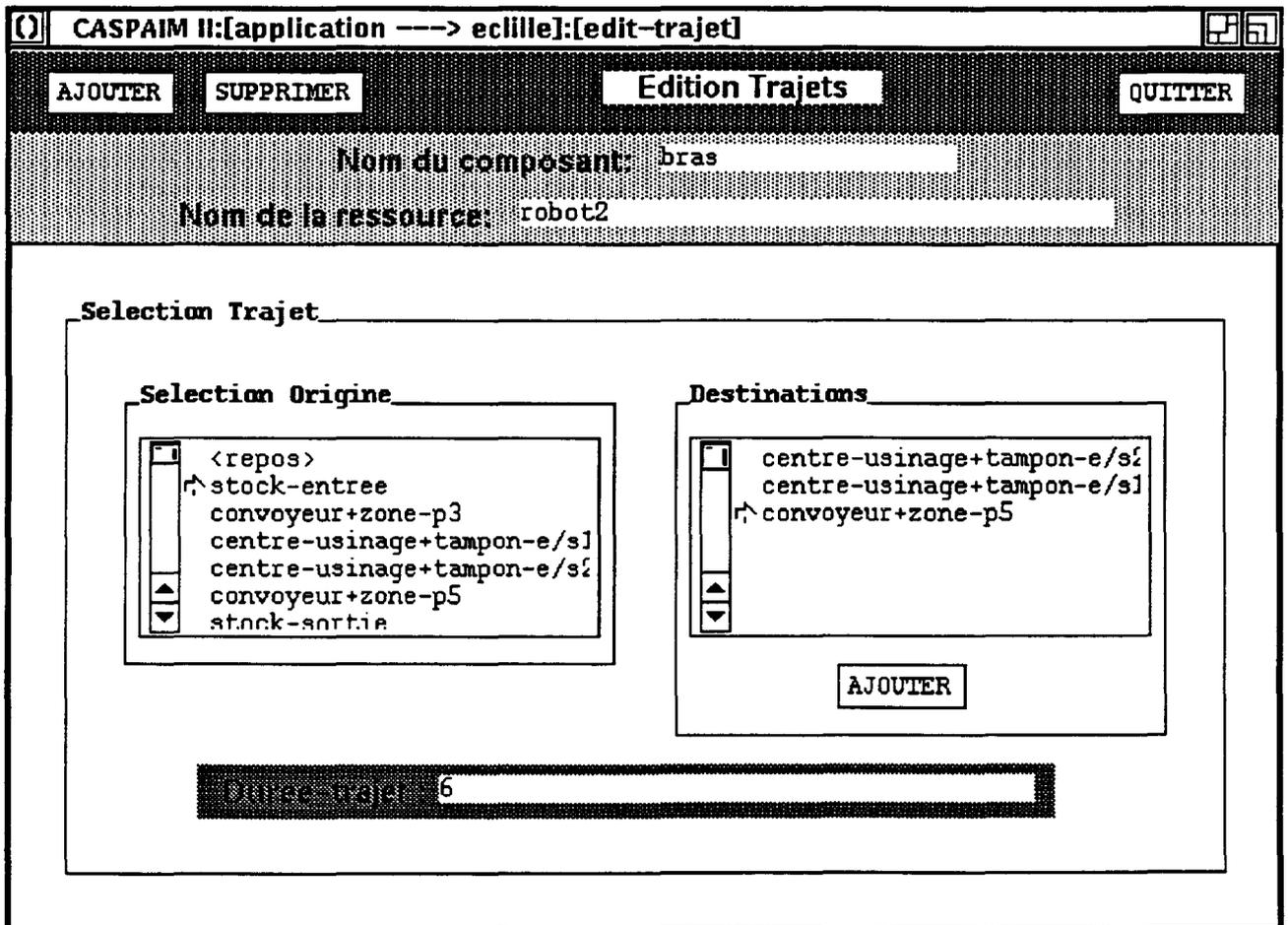
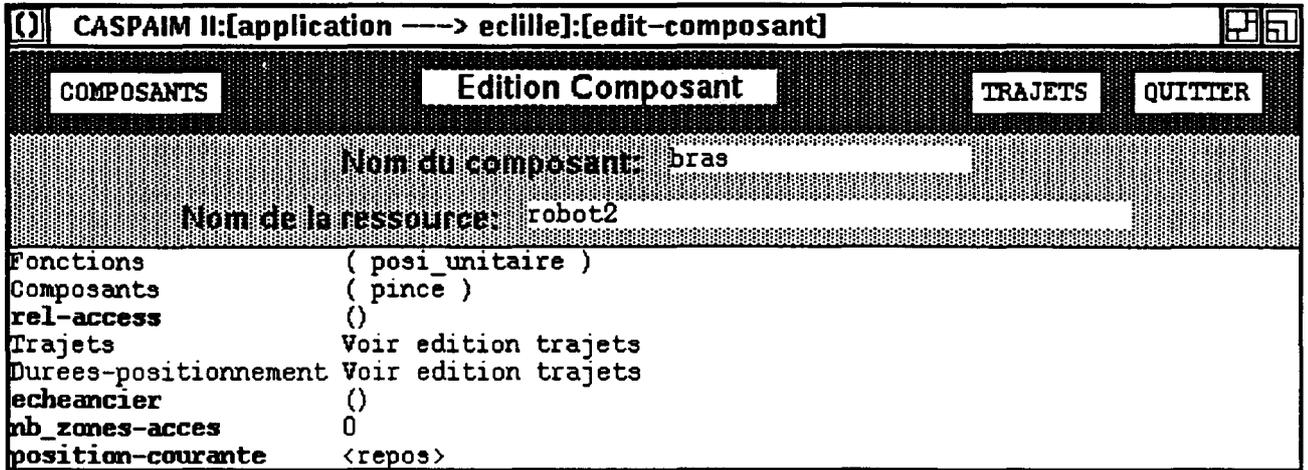


Figure III-2-6b : Fenêtre d'édition des trajets

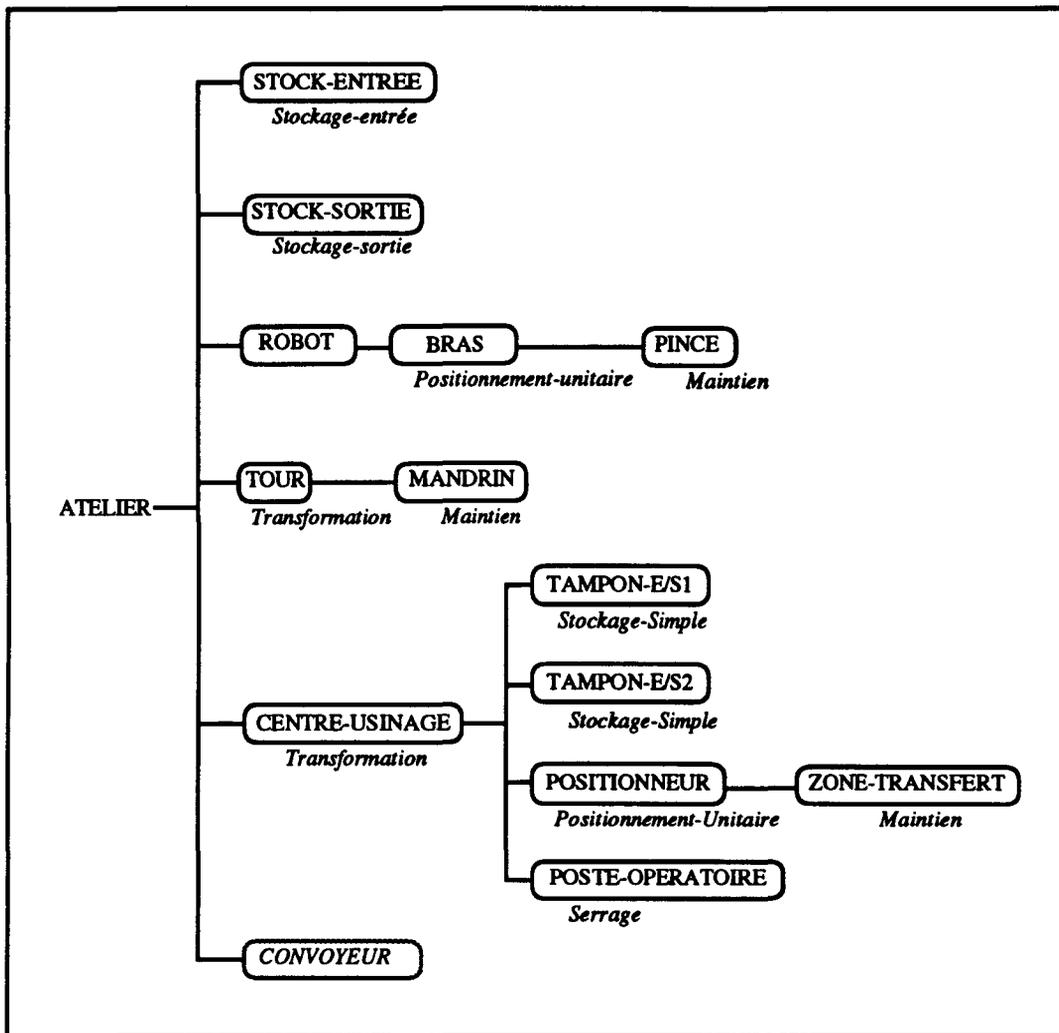
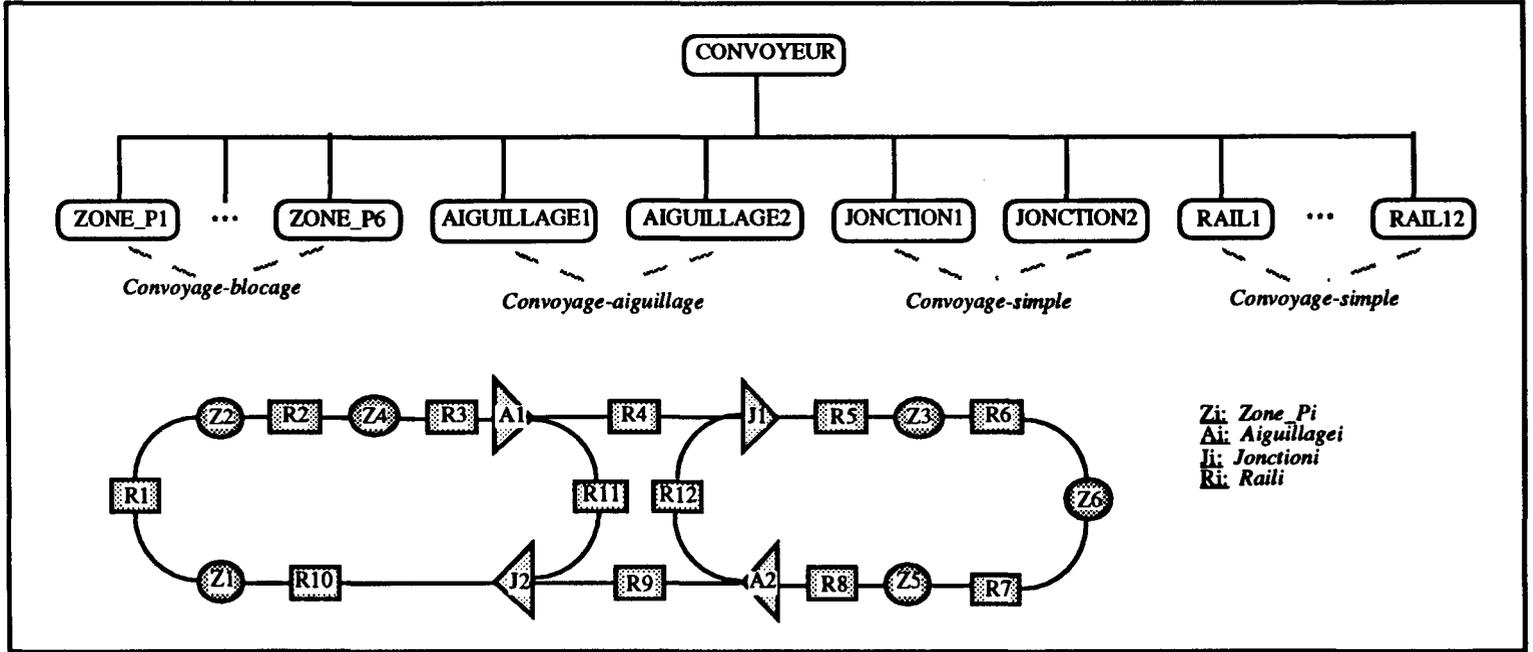


Figure III-2-7 : Description des prototypes

Figure III-2-8 : Description du convoyeur



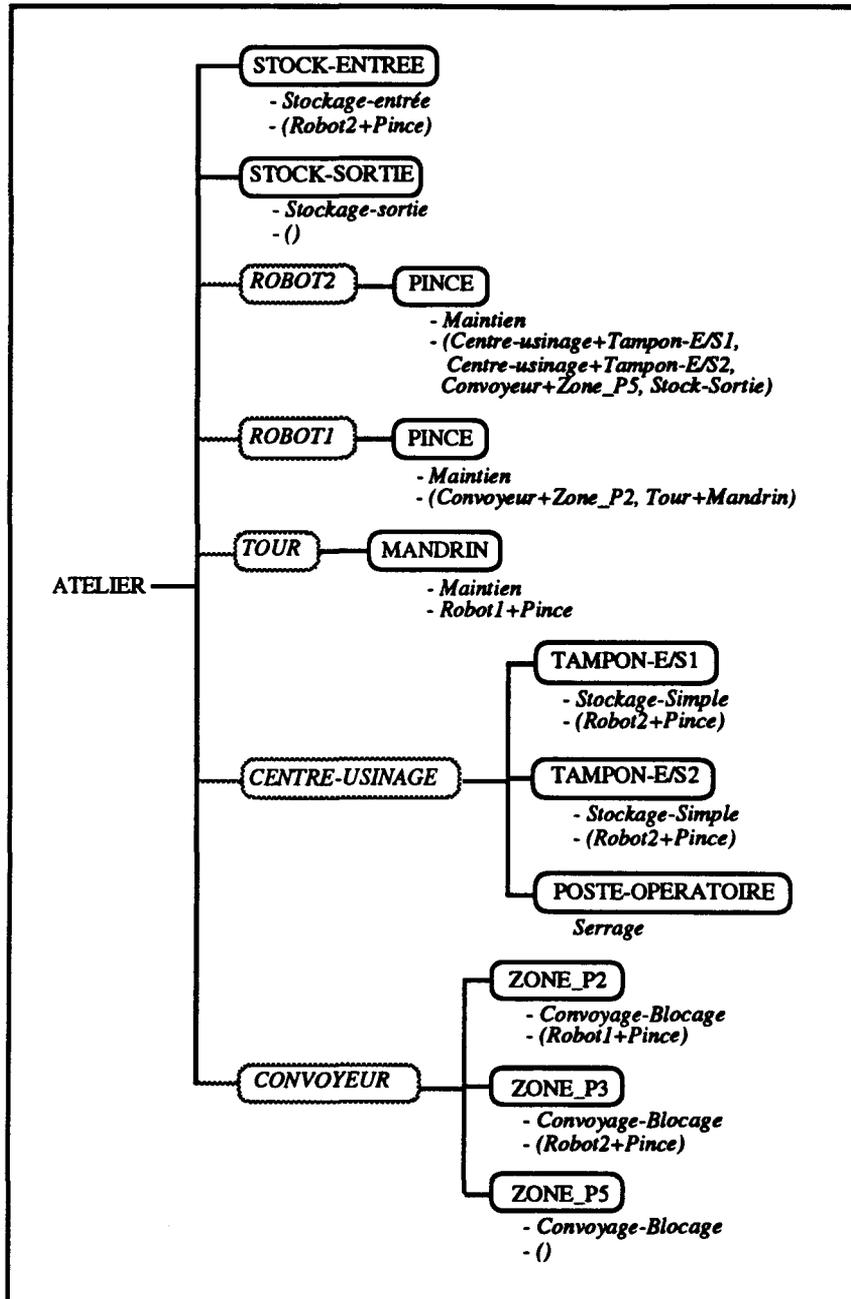


Figure III-2-9 : Lieux caractéristiques et relations d'accessibilité

## II-5- Génération des gammes opératoires

### II-5-1- Les différentes étapes de la démarche

Les différentes étapes de génération ont été présentées brièvement au chapitre II (Par. III-3-2-2). Nous rappelons ici la démarche globale qui a été schématisée sur la figure II-3-11.

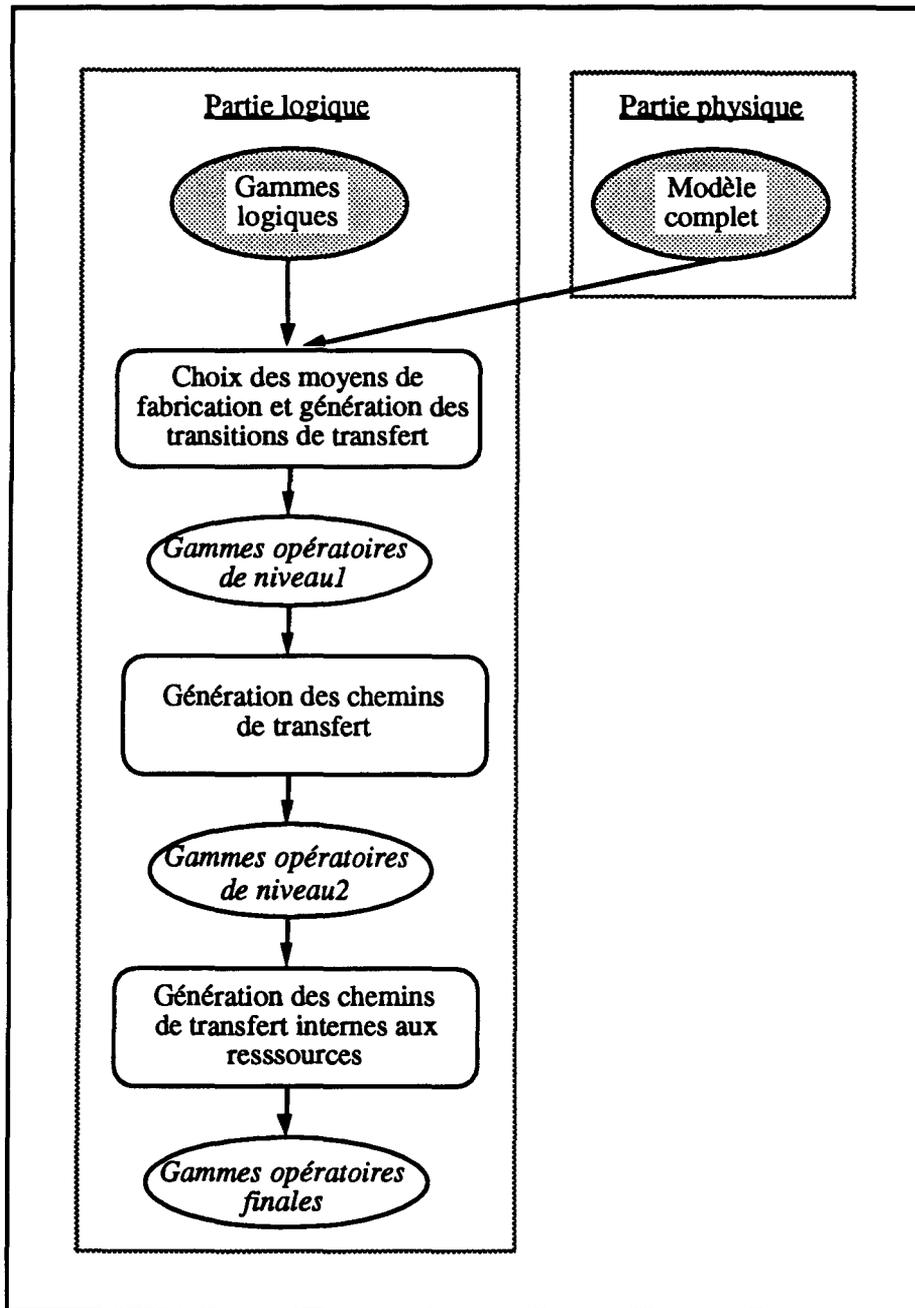


Figure II-3-11 : Démarche de génération

Cette démarche est composée de trois niveaux intermédiaires de génération.

**- Niveau 1 : Intégration de l'aspect fonctionnel**

Cette première phase consiste, d'une part, à initialiser la démarche (étape 0) par spécification des lieux de départ et d'arrivée pour chaque gamme logique (place initiale et finale) et des postes opératoires candidats (machines) pour chacun des traitements.

Ensuite, ces postes opératoires sont effectivement intégrés au niveau des gammes (étape 1) et des transitions de transfert sont générées pour indiquer le passage d'un produit d'un poste vers un autre (étape 2).

**- Niveau 2 : Intégration de l'aspect transitique**

A ce niveau, les différents chemins possibles, pour transférer un produit entre deux machines consécutives au sein d'une gamme donnée, sont générés par l'intermédiaire des relations d'accessibilité.

**- Niveau 3 : Intégration des modules de transfert**

Ce dernier niveau consiste à générer les gammes finales par intégration des différents modules de transfert spécifiques et respectifs à chacun des moyens de production.

La structure générale de ces modules a été présentée dans le chapitre II (Par. II-3-12).

## **II-5-2- Intégration de l'aspect fonctionnel**

### **II-5-2-1- Étape 0 - Initialisation**

Les lieux de départ et d'arrivée sont choisis, a priori, pour initialiser la phase de génération.

Ensuite, pour chacun des traitements, figurant sur les gammes logiques, une liste des machines candidates, capables de réaliser le traitement considéré, est effectuée.

Ensuite, sachant que chaque transition, réalisant un traitement, aura, pour lieu de travail, la machine (poste opératoire) indiquée au niveau de la place située en aval de celle-ci, et qu'une machine ne sera jamais le lieu final, où seront stockés les produits finis, un problème subsiste. Pour y remédier, une place finale, représentant le lieu d'arrivée et correspondant au lieu choisi ci-dessus, est ajoutée en fin de chaque gamme logique.

Ensuite, pour permettre d'y accéder, une transition de transfert est également ajoutée (figure III-2-10).

Pour notre exemple, les lieux **stock-entrée** et **stock-sortie** désignent respectivement les lieux de départ et d'arrivée pour chacune des deux gammes.

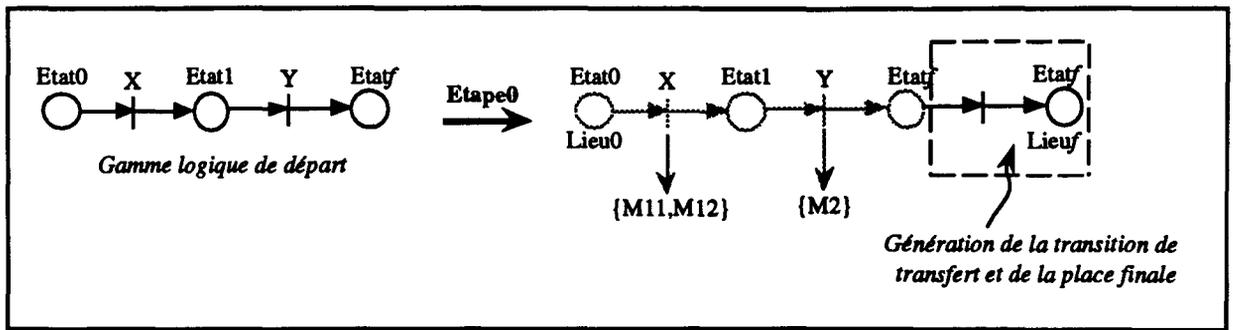


Figure III-2-10 : Choix des lieux de fabrication

### II-5-2-2- Étape 1 - Intégration des machines de fabrication

A partir de la liste des machines candidates pour chacun des traitements, le nom de la machine, réalisant un traitement au niveau d'une transition, est indiqué sur la place aval de cette transition.

Chaque traitement, ayant plusieurs machines possibles, générera une structure alternative (divergence au niveau des gammes opératoires), comme le montre la figure III-2-11. Ce type de structure traduit une **flexibilité de choix des machines**.

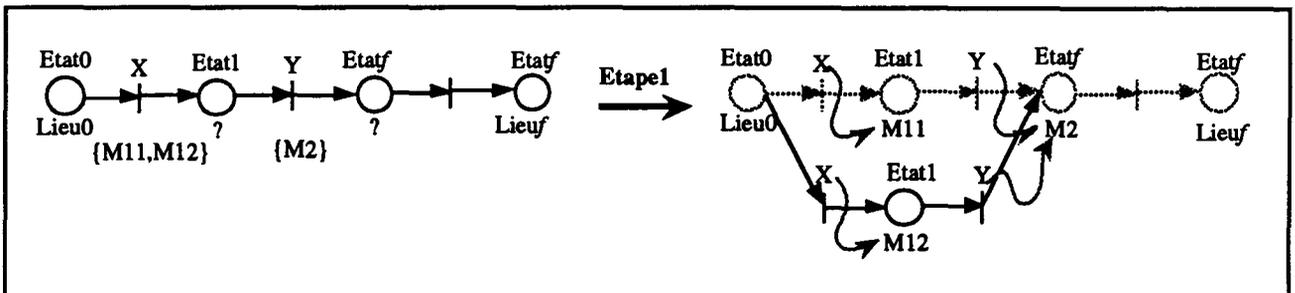


Figure III-2-11 : Flexibilité de choix des machines

Il est à noter un point particulier, en ce qui concerne les structures comportant une convergence sur une place donnée et traduisant **une flexibilité d'ordre des opérations** (figure III-2-12). Etant donné la non-unicité et la différence des traitements (X et Y) sur les transitions amonts à ce type de place, une duplication de celle-ci est nécessaire pour indiquer le nom de la machine correspondante à chacun des traitements.

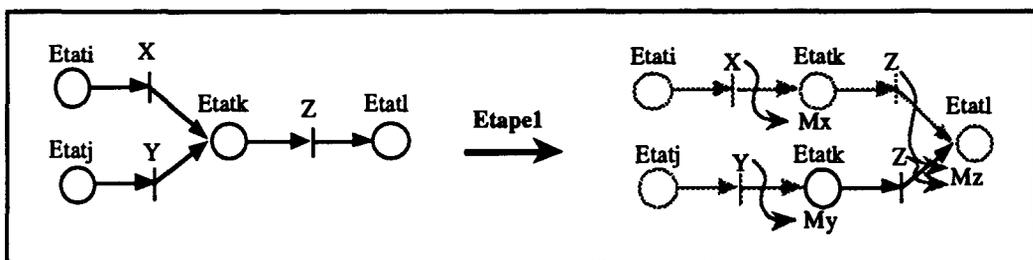


Figure III-2-12 : Flexibilité d'ordre des opérations

### II-5-2-3- Étape 2 - Intégration des transitions de transfert

Chaque transition, dont le lieu de la place amont est différent de celui de la place aval (transfert), ainsi que les états (traitement), est dupliquée (transfert puis traitement). Une place intermédiaire est donc générée reliant ces deux transitions et ayant comme lieu, celui de la place amont et comme état, celui de la place aval (figure III-2-13) à la transition en question.

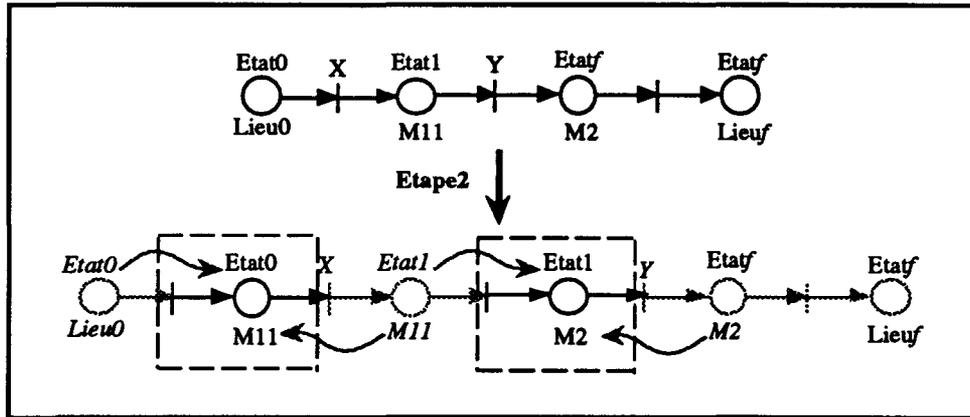


Figure III-2-13 : Dissociation des transferts et traitements simultanés

L'application, à notre exemple, des premières étapes de la génération est représentée par la figure III-2-14.

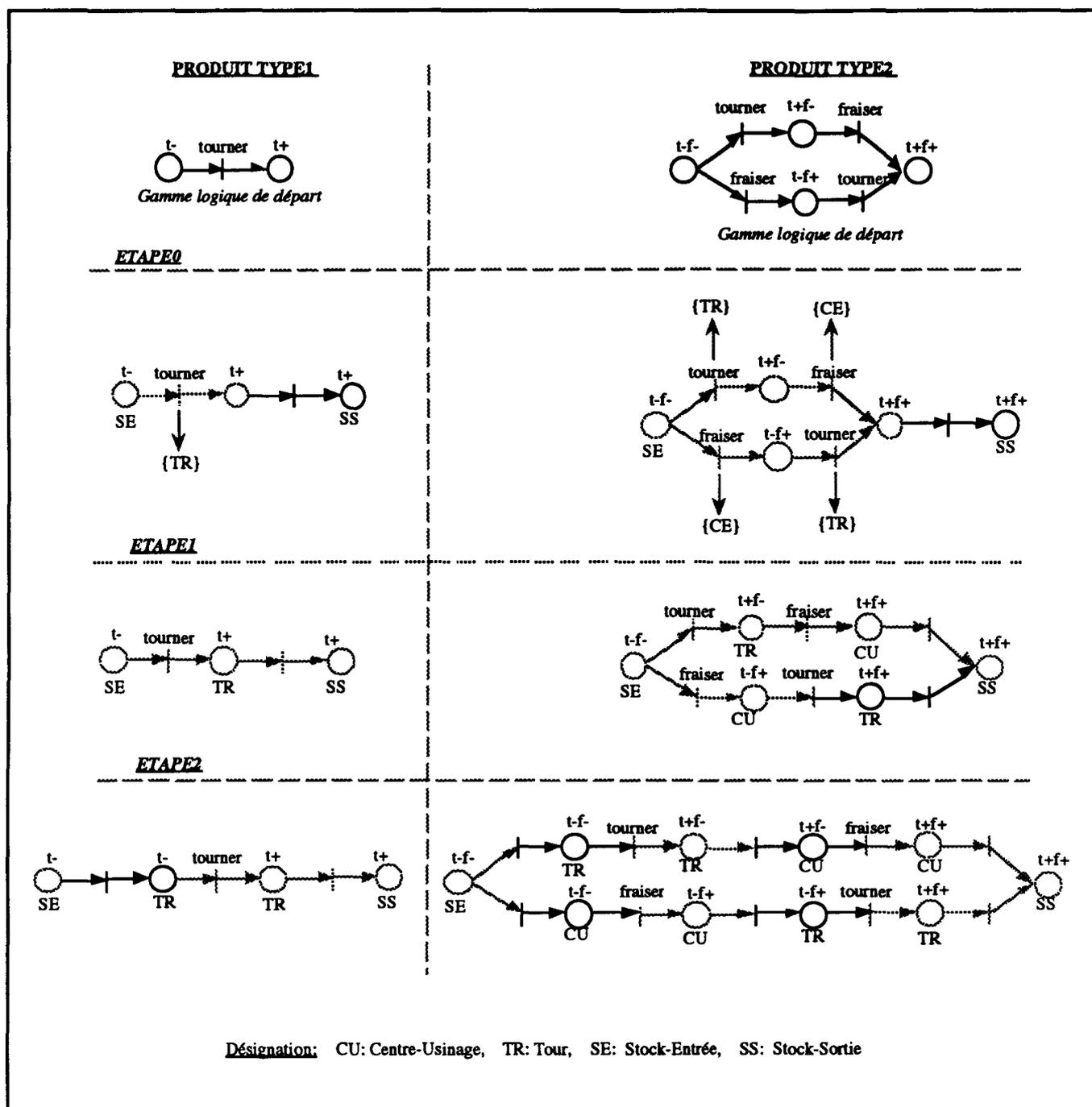


Figure III-2-14: Gammes opératoires de niveau 1

### II-5-3- Intégration de l'aspect transitique

La génération des chemins de transfert permet d'intégrer les moyens de type transport, manipulation et stockage intervenant dans un transfert de produits entre les différentes machines de fabrication. Les gammes de niveau 1 mettaient en évidence une flexibilité relevant de l'aspect fonctionnel (traitement), uniquement, alors que le niveau 2 est basé sur l'aspect transitique en introduisant la **flexibilité de routage** des pièces.

Cette génération s'effectue en recherchant les différents chemins possibles (relations d'accessibilité externes indirectes) pour transférer un produit, d'un lieu à un autre adjacent au sein des gammes de niveau 1 (lieu de départ -->Mi, Mi-->Mj, Mj--> lieu d'arrivée).

Quatre restrictions sont à considérer pour éviter, en particulier, la génération de chemins infinis (boucles) :

-- r1 : chaque relation d'accessibilité, concernant deux moyens, comporte deux informations dont le type de la relation (mono ou bi-directionnelle) et dans le cas d'une relation mono-directionnelle, le sens de l'accès en fonction de la nature de ces moyens (accédant vers accédé),

-- r2 : chaque relation, entre deux moyens, est restreinte aux types de pièces pouvant être acceptés par chacun de ces moyens (figure III-2-15),

-- r3 : toute séquence comportant au moins deux éléments ne peut se répéter, de manière consécutive, dans un chemin donné,

-- r4 : chaque stock-tampon (stock rudimentaire de type *stockage-simple*) intervenant dans un chemin, comme lieu de passage, ne devra être utilisé qu'une seule fois pour ce chemin.

Cette dernière restriction relève plutôt du bon sens. Sachant qu'un stock-tampon a pour rôle, uniquement, de conférer une certaine autonomie au moyen de fabrication amont ou aval, dans le cas d'une défaillance de l'un d'entre-eux /ING88/. Il est donc, tout naturel d'interdire le retrait d'une pièce d'un stock-tampon pour l'y retransférer sans passer par, au minimum, une machine de fabrication.

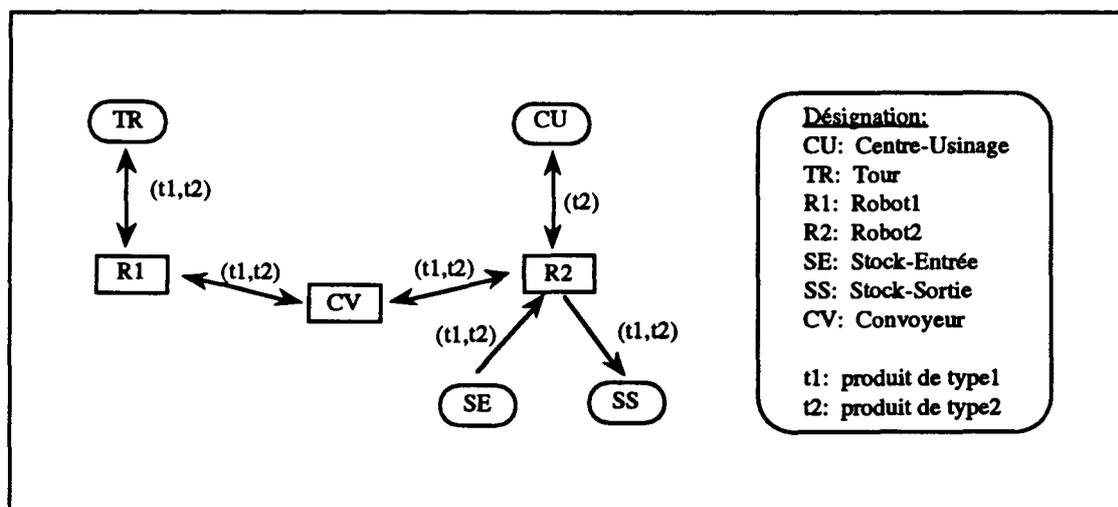


Figure III-2-15 : Restrictions r1 et r2

Les différents transferts à analyser, concernant l'exemple, sont :

-- gamme 1 : SE-->TR et TR-->SS,

-- gamme 2 : SE-->TR, TR-->CU et CU-->SS puis SE-->CU, CU-->TR et TR-->SS.

Les transferts SE-->TR et TR-->SS sont indifférents vis à vis des deux gammes, du fait de la non restriction r2 relative aux types de produits concernés pour ces transferts. De même, les transferts TR-->CU et CU-->TR, concernant la deuxième gamme, seront indifféremment analysés du fait de la non restriction r1 relative au sens établi pour ces transferts (figure III-2-15).

Les seuls transferts analysés, ainsi que, les différents chemins possibles, pour effectuer ces transferts, sont donc les suivants :

- Transfert 1 (tr1) : SE--->TR  
SE--->R2--->CV--->R1--->TR
- Transfert 2 (tr2) : TR--->SS  
TR--->R1--->CV--->R2--->SS
- Transfert 3 (tr3) : CU<--->TR  
CU<--->R2<--->CV<--->R1<--->TR (tr31 et tr32)
- Transfert 4 (tr4) : SE--->CU  
SE--->R2--->CV--->R2--->CU (tr41) ou SE--->R2--->CU (tr42)
- Transfert 5 (tr5) : CU--->SS  
CU--->R2--->CV--->R2--->SS (tr51) ou CU--->R2--->SS (tr52)

Une structure alternative sera générée pour représenter la possibilité d'utiliser plusieurs chemins pour un transfert donné (tr4 et tr5), comme le montre la figure III-2-16 représentant le développement de la deuxième gamme. Sur ce schéma, seuls les transferts tr4 et tr1 ont été développés et les autres sont représentés sous forme de macro-transitions.

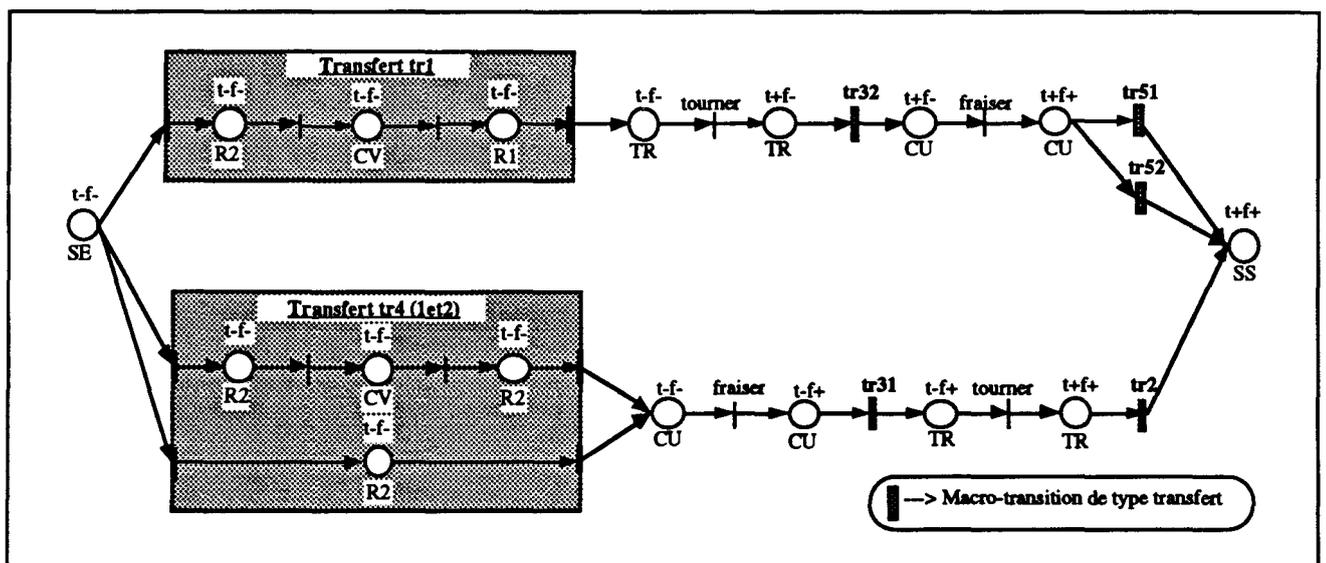


Figure III-2-16 : Gammes opératoires de niveau 2

La résolution des indéterminismes directionnels, inhérents à la flexibilité de choix des machines, d'ordre des traitements et de routage, relève d'un niveau supérieur ou module décisionnel.

#### II-5-4- Intégration des modules de transfert

Ce dernier niveau de génération utilise donc les primitives de structuration pré-définies à travers les différents modules représentant les transferts internes à chacune des ressources (Chap. II, Par. III-3-2-3).

Ce type de module met en évidence les différents flux internes relatifs à une ressource et **significatifs** vis à vis du système de **coordination globale** (gestion au niveau atelier). En effet, le niveau de représentation utilisé pour ce type de modèle permet de mettre en évidence uniquement les transferts éventuels entre les différents lieux caractéristiques d'une ressource (figure II-3-12).

Nous verrons, dans le paragraphe suivant, l'élaboration d'un modèle détaillé des différents flux internes d'une ressource complexe, mettant en évidence tous les lieux caractéristiques ou non (gestion au niveau ressource).

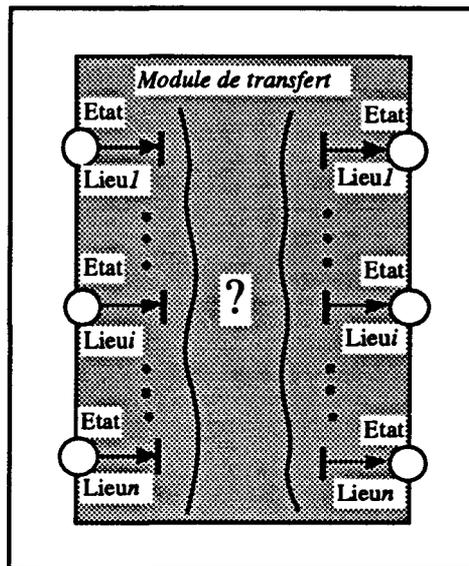


Figure II-3-12 : Modèle général de base

A partir de ces liens, on obtient une représentation symbolique du modèle de transfert d'une ressource dite complexe, c'est à dire comportant au moins un lieu non caractéristique et/ou plusieurs lieux caractéristiques (figure II-3-13).

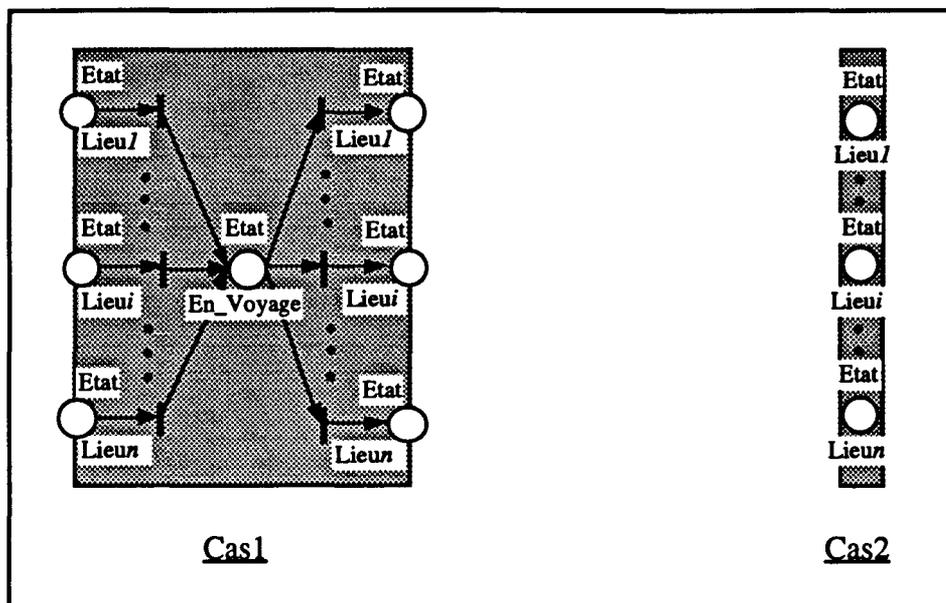


Figure II-3-13 : Modèle spécifique à une ressource complexe

Enfin, chaque module est particularisé, pour l'application considérée, en mettant en évidence en entrée (respectivement en sortie) de ce module, uniquement, les lieux de la ressource en question qui sont en relation d'accessibilité externe avec la ou les ressources situées en amont (respectivement en aval) au niveau d'une gamme donnée (type de produit).

Donc, la structure finale d'un module est fonction, d'une part, du type de produit (gamme) et, d'autre part, des ressources avec lesquelles la ressource correspondante est en relation pour établir un transfert donné.

La connexion de deux modules s'effectue en dupliquant la transition, les reliant sur une gamme de niveau2, autant de fois, qu'il y a de relations entre les différents lieux caractéristiques concernés (en entrée ou en sortie) pour ce lien.

La génération des modules, constituant l'exemple traité, est représentée sur la figure III-2-17. Chacune des places y est développée et représentée à travers les différents chemins de transferts (invariance de l'état du produit) mis en évidence lors de la génération des gammes de niveau2.

L'association de ces branches de transfert, par l'intermédiaire d'une transition de type traitement (transformation d'état), générera les gammes finales (figure III-2-18). Sur ces gammes, la mise en évidence des lieux caractéristiques ajoute une **flexibilité de routage** traduisant les différentes possibilités pour accéder et quitter, indifféremment, une ressource par l'intermédiaire de ces lieux.

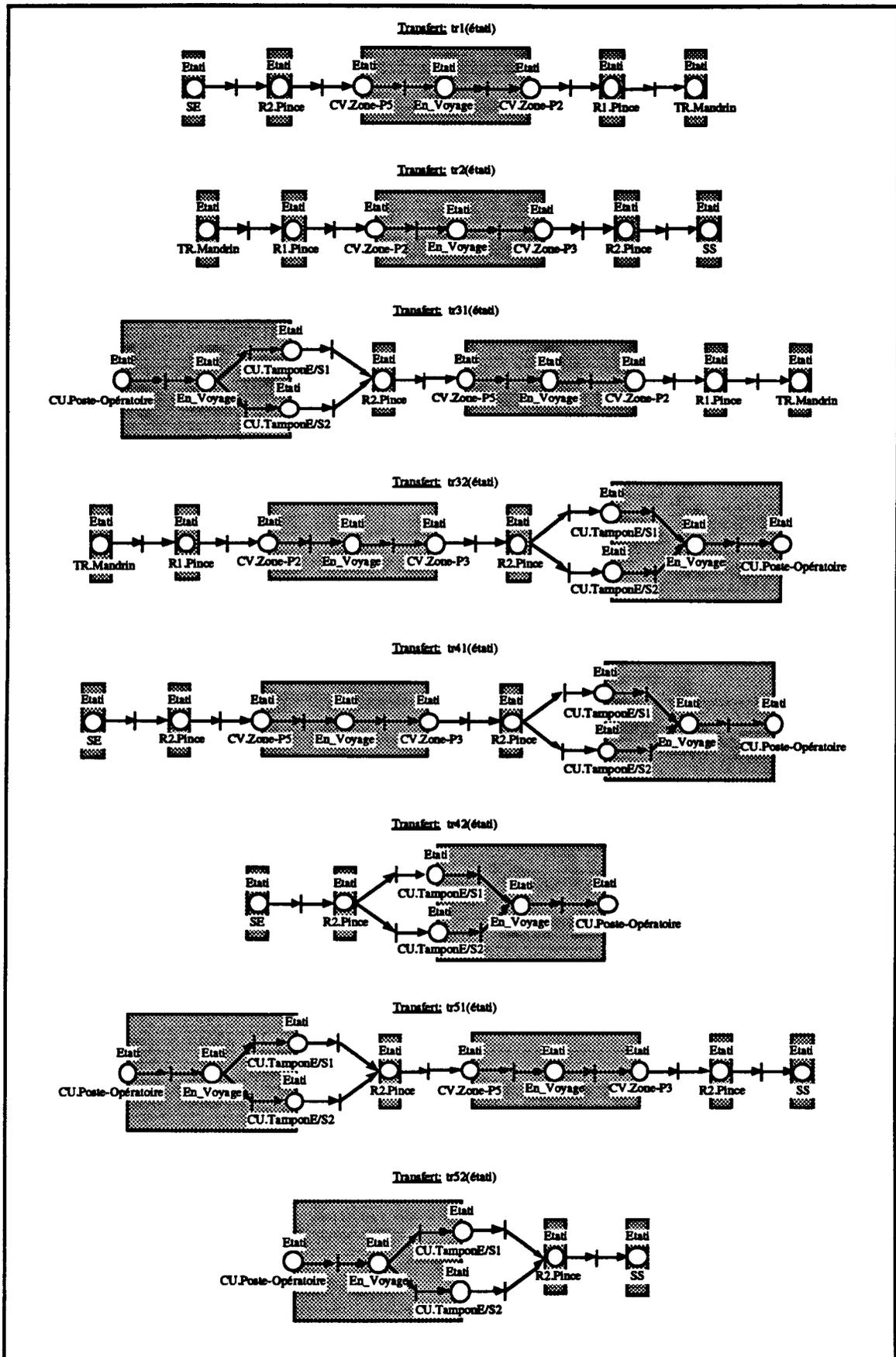


Figure III-2-17 : Chemins de transfert



## II-6- Modèle détaillé des transferts internes et gammes TRL

Les ressources dites “complexes” nécessitent parfois un module de gestion (pilotage) locale pour réaliser un routage interne, en temps réel, des différents produits qu’elles supportent.

Un module de pilotage local comporte, exactement, les mêmes fonctionnalités qu’un système global (figure II-2-6), dont une représentation, suivant les concepts que nous avons définis, a été proposée dans le chapitre II (figure II-2-7).

Ce routage interne est mis en évidence à travers un modèle détaillé des différents flux véhiculés à travers les différents lieux, sans a priori sur leur nature, constituant une ressource complexe.

Ce modèle est donc une représentation générale et complète des modules de transfert, qui peut se définir en tant que **modèle comportemental**, d’un point de vue transitique (graphe de transfert), d’une ressource complexe.

De plus, si ces ressources comportent un **système de palettisation**, une gestion du routage interne des différents supports (palettes) libres, est également nécessaire par l’intermédiaire d’une **gamme TRL**.

Le graphe de transfert, relatif aux trajets possibles de ces supports vides, constitue alors, dans ce cas, une partie du graphe complet de transfert. L’autre partie, faisant référence à l’association d’une pièce et d’un support, définit le trajet commun effectué par ces deux entités liées temporairement.

La génération de ces graphes de transfert se fait également de manière systématique, à partir de la définition structuro-fonctionnelle d’une ressource complexe.

En effet, chaque transfert sur ce graphe représente une **relation d’accessibilité interne** décrite à travers la définition fonctionnelle d’une ressource. Certaines fonctions intègrent, dans leur définition, des liens d’échange de pièces entre différents lieux (internes et externes) à travers les paramètres de fonctionnement.

Tel est le cas, notamment, pour les fonctions de type convoyage (zones amonts et aval) et de type mouvement (trajets).

Pour notre exemple d’application, les seules ressources dites complexes et, donc, nécessitant, **a priori**, une gestion locale des transferts internes, concernent le convoyeur et le centre d’usinage.

Les graphes de transfert, relatifs à ces deux ressources, sont représentés sur la figure III-2-19. Ils mettent en évidence tous les points nécessitant une commande de

coordination et, en particulier, les points de concurrence susceptibles de présenter d'éventuels conflits d'accès et indéterminismes directionnels.

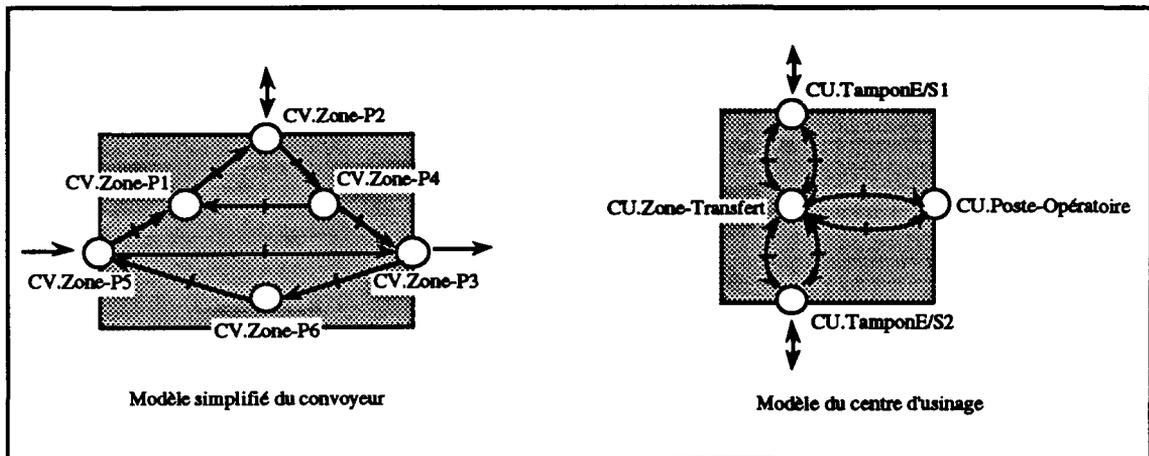


Figure III-2-19 : Les graphes de transfert

Sur le modèle du convoyeur, seules les zones singulières permettant un arrêt par blocage des produits (Zone-Pi) ont été représentées. De manière générale, c'est au niveau de ces zones d'arrêt que les décisions de routage sont fixées (positionnement des aiguillages).

Ce modèle simplifié est donc suffisamment représentatif pour une gestion complète du routage interne.

## II-7- Conclusion

Dans cette dernière partie, nous avons détaillé la démarche de génération des gammes opératoires représentant un modèle de base, ou ensemble de constituants de ce modèle (gammes), développé et structuré du système de coordination.

Le modèle final et complet sera obtenu par enrichissement, à travers les étapes ultérieures de la démarche générale CASPAIM, de la manière suivante :

-1- Différents processus de configuration (places) et de coopération (transitions) seront définis et intégrés au niveau de chaque gamme opératoire (figure III-2-20).

Ces différents processus, relatifs à la commande effective des ressources de production, exprimeront, respectivement, les protocoles de sélection et de demande d'exécution d'une opération particulière, à réaliser sur un produit donné, et les protocoles de synchronisation et de communication inter-ressources nécessaires à la réalisation d'un changement de lieu.

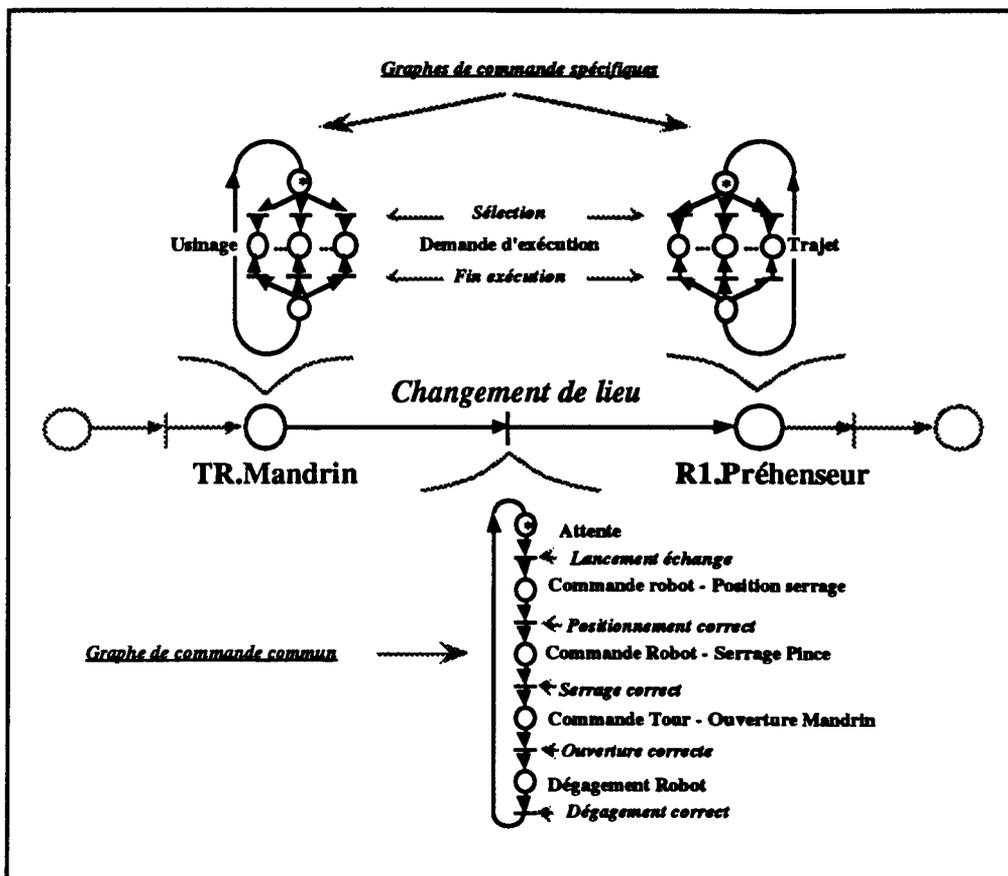


Figure III-2-20 : Graphes de commande

-2- Les différentes gammes opératoires, définies jusqu'à lors indépendamment les unes des autres, seront ensuite interconnectées par l'intermédiaire de places de liaison exprimant des exclusions mutuelles (contraintes d'accès et de disponibilité) relatives au partage des ressources communes (figure III-2-21).

Ces places d'exclusion permettront, d'une part, de mettre en évidence les différents points pouvant générer d'éventuels conflits résultant de la réalisation simultanée des gammes (parallélisme de flux) et, d'autre part, d'exprimer des stratégies (protocoles) d'allocation et de restitution de ressources de production.

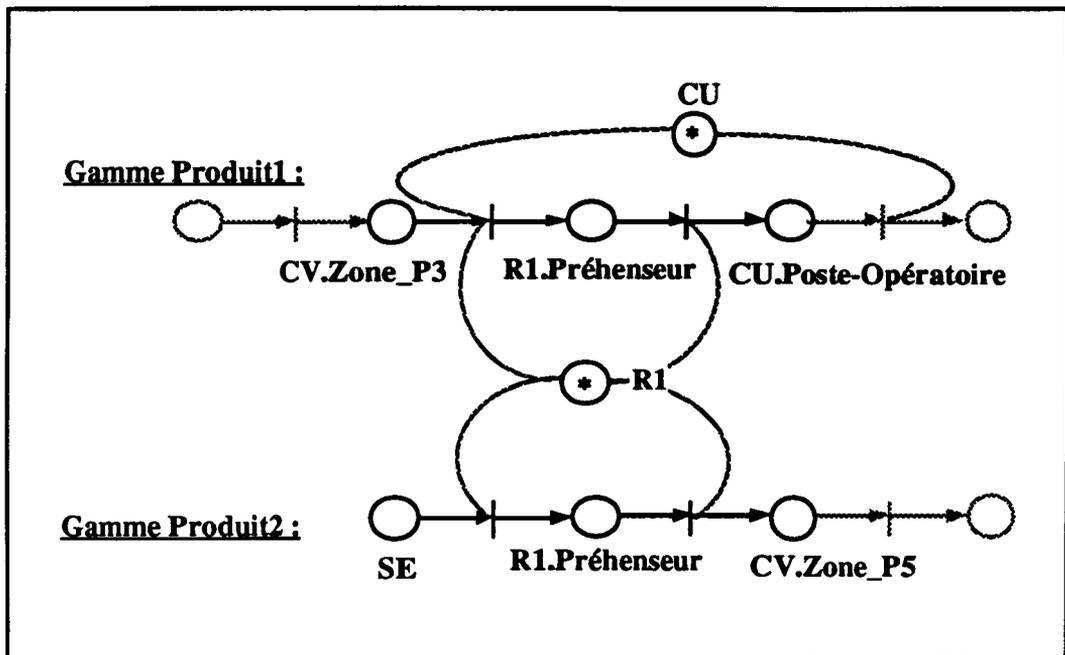


Figure III-2-20 : Places de liaison

-3- Ensuite, des informations relatives à l'image de la partie procédé sont également ajoutées pour obtenir un **modèle autonome** en vue d'une **simulation** effective.

Ces informations supplémentaires sont relatives, d'une part, au **dimensionnement** (capacités) des différentes zones de stockage et, d'autre part, à la **temporisation** des différentes opérations devant être réalisées sur un lieu opératoire (programme-outil) ou sur un lieu de transfert (programme-robot).

Cette temporisation, étant relative au temps d'exécution d'une commande effective, est prise en compte à travers les différents **graphes de configuration** et de **coopération** (temporisation des places).

Le modèle complet de la partie procédé (comportement dynamique) est, bien entendu, utilisé en simulation en tant qu'outil de validation et d'évaluation du système de coordination et, plus largement, du système de gestion/contrôle.

Notons, enfin, l'intérêt d'une telle démarche de génération. Elle est principalement caractérisée par le type de **représentation structurée** et **hiérarchique** des gammes qu'elle offre par l'intermédiaire des chemins de transfert et des modules de transfert (primitives de structuration). Cela permet d'effectuer une validation systématique des propriétés du modèle de coordination et d'obtenir des vues synthétiques et concises du suivi des produits à des niveaux de détail intermédiaires.

## CONCLUSION GÉNÉRALE

## **Résumé**

Nous avons défini, dans ce mémoire, une méthode systématique de spécification et de conception préliminaire de la partie coordination d'un système de production à caractère discret. Elle est principalement basée sur une représentation adéquate de la partie procédé.

✿ A travers cette étude, le rôle d'un système de coordination a été défini précisément en mettant en évidence ses principales fonctions, à savoir assurer :

- le séquençement, établi par le système de pilotage, et les demandes d'exécution des différentes opérations nécessaires à la réalisation des différentes gammes de fabrication,
- la coopération (synchronisation et communication) des différentes ressources de production, lors d'un changement de support (échange) pour un produit donné, qui peut se caractériser par l'instant exact où ce produit passe d'une ressource à une autre.

La démarche globale utilise les principes préconisés en Génie Logiciel Orienté Objet pour le développement d'une solution.

Elle utilise une approche descendante et systématique (analyse opérationnelle), par affinements successifs visant à mettre en évidence des éléments de base génériques (modules de structuration) relatifs à l'application considérée.

Ceci permet, ensuite, de favoriser des mécanismes de réutilisation suivant une approche ascendante.

Pour cela, elle met en œuvre la notion de Composant Logiciel Réutilisable par l'intermédiaire des primitives de spécification et de modélisation de la partie procédé (physique) et des primitives de structuration de la partie commande (logique).

Ces différentes primitives sont relatives à la représentation de la structure fonctionnelle de la partie opérative d'une ressource.

✿ La démarche de spécification permet de formaliser indépendamment les informations de base relatives à la partie logique et à la partie physique, à savoir, respectivement :

- les objectifs et contraintes de production : types de produits, traitements à réaliser (gammes) et ratios de production,
- et les moyens de production : comportement des ressources, notamment complexes, paramètres et contraintes de fonctionnement et représentation topologique.

Elle utilise une notation précise et rigoureuse suivant une syntaxe et une sémantique relatives aux primitives pré-définies et utilisées pour la description structuro-fonctionnelle d'une ressource. Cette syntaxe est basée sur des règles de cohérence et de bon sens.

✿ Nous utilisons un formalisme de type graphe de Petri ordinaire, pour caractériser la partie logique à travers un ensemble de gammes, décrivant les différents types de produits à fabriquer sous forme d'une succession de traitements (usinage, assemblage ...).

Cette notion de gamme est relative à l'approche orientée "flux de produits" utilisée dans notre démarche pour développer et représenter le système de coordination.

La mise en œuvre de notre approche de conception (préliminaire) du système de coordination correspond, alors, à un développement progressif (prototypage lent) d'un modèle de la partie logique (gammes).

Ce développement utilise, comme informations de départ, des gammes dites "logiques" issues de la spécification pour aboutir à des gammes plus complètes dites "opératoires".

Cette démarche est principalement basée sur la notion de lieu ou de support de pièce, qui représente le concept fédérateur de notre approche.

Elle nous a permis de mettre en évidence des lieux dits "caractéristiques", pour une application particulière, à partir de relations d'accès entre ressources pour un changement de support.

Ces relations sont relatives à l'aspect transitique. Elles permettent d'intégrer l'ensemble des ressources nécessaires au transport des produits entre les différentes machines de fabrication.

La représentation du système de coordination, sous forme de gamme, se résume, alors, à une succession de supports caractéristiques nécessaires à une commande de coordination en terme d'effets (lancement d'une opération), de façon à mettre en évidence tous les points nécessitant une coopération.

✿ En ce qui concerne la caractérisation de la partie physique, nous utilisons un formalisme de type relationnel et fonctionnel.

Chaque relation représente un lien de type "supportant/supporté" faisant apparaître une arborescence d'organes opératifs. Chaque organe, appartenant à un niveau donné, est support de la sous-structure inférieure et assure une fonction opérative bien particulière.

La nature de ces liens représente d'ailleurs le critère de décomposition, lors d'une description structuro-fonctionnelle, pour mettre en évidence les différents supports de pièces constituant les organes terminaux (stockage).

La démarche de spécification de cette partie utilise les primitives de spécification et de modélisation représentant l'ensemble des fonctions opératives nécessaires pour obtenir un modèle complet de la partie procédé (prototypage rapide).

Ces différentes primitives représentent des invariants de comportement ou de fonctionnement relatifs à un invariant matériel de type "actionneur".

## ***Bilan***

Le principal bilan, que l'on peut tirer de ce travail, peut se résumer de la manière suivante. La définition d'une méthode de conception d'un système de commande nécessite obligatoirement, si elle se veut efficace, une démarche permettant d'appréhender et de représenter correctement le comportement du système commandé, en l'occurrence, la partie procédé.

En effet, on ne peut envisager de concevoir correctement et efficacement un système de commande globale sans connaître précisément le comportement des différentes ressources de production qui doivent coopérer.

☼ C'est dans ce sens que la notion de lieu caractéristique, représentant tous les supports sur lesquels les opérations de traitement et de mouvement vont être réalisées, a été définie.

L'identification de ces différents supports permet de mettre en évidence précisément tous les points nécessitant une commande de coordination (sélection et exécution d'une opération).

De même, la prise en compte fine de leur comportement (statique, mobile, actif ...) permet une définition correcte de différents types de scripts ou modalités de coopération nécessaires à un changement de support (Chap. II, Par. II-3-2-3).

Ces deux derniers points, relatifs à la modélisation de la partie procédé, vont ainsi contribuer à une représentation et une définition correctes du système de coordination.

En effet, la démarche de génération des gammes opératoires utilise ces notions pour développer, de manière hiérarchique et structurée, des vues synthétiques et concises, à des niveaux de détail intermédiaires. Chaque niveau correspond, alors, à un niveau précis de gestion/contrôle du système de pilotage.

☼ La notion de fonction opérative, en tant qu'invariant de comportement, permet d'obtenir facilement un modèle détaillé et adéquat de la partie procédé. Ce modèle sera exploité, en simulation, à des fins de validation et d'optimisation du système par évaluation de différentes stratégies de pilotage.

L'aspect sûreté de fonctionnement peut être également abordé à travers ce modèle spécifique et détaillé de la partie procédé qui va permettre d'intégrer des traitements liés à la surveillance.

On peut ainsi définir des modes de marche dégradés en simulant l'occurrence de certains aléas de fonctionnement, ainsi que des méthodes de détection et de diagnostic par propagation de certains défauts au sein du modèle.

☼ La principale originalité de notre démarche est donc l'obtention aisée et systématique d'un modèle hiérarchisé de la partie procédé, permettant une exploitation convenable, à la fois, en simulation et en conception.

Le modèle obtenu répond, d'une part, de manière assez satisfaisante, pour la simulation, au compromis habituel entre facilité de description et puissance d'expression d'un modèle. Et d'autre part, il permet, en conception, le développement systématique d'un modèle préliminaire du système de coordination.

Cela provient du fait que l'utilisateur ou le concepteur ne soit pas conditionné par un ensemble de concepts de niveau d'abstraction trop spécifique à un ensemble d'applications (machines, robots, convoyeur ...). Il définit, lui-même, ses concepts d'abstraction du domaine considéré à partir des concepts pré-définis plus élémentaires selon une description structuro-fonctionnelle et à partir de primitives de spécification et de modélisation.

☼ Mais, l'inconvénient majeur de la démarche, qui a suscité d'ailleurs une certaine difficulté lors de la mise en œuvre, provient du type d'appellation choisi pour identifier chacune de ces primitives.

En effet, le choix des identificateurs (serrage, convoyage, positionnement ...) joue un rôle relativement important au niveau de leur interprétation. Et l'efficacité de la démarche est totalement conditionnée par l'interprétation faite de ceux-ci.

Une mauvaise interprétation va, donc, considérablement nuire au processus d'identification des différents supports lors d'une description structuro-fonctionnelle.

De ce fait, pour exploiter correctement la démarche, ces identificateurs doivent être assez explicites et assez représentatifs de la sémantique (comportement) que l'on veut exprimer ou véhiculer à travers les fonctions correspondantes.

L'objectif est, bien sûr, d'aboutir à une interprétation unique quelle que soit l'affinité de tel ou tel utilisateur.

De plus, certaines nuances présentées par des fonctions voisines, du point de vue comportemental, ne sont pas toujours perçues immédiatement.

Une première solution, à terme, pourrait être l'utilisation d'un glossaire définissant chacun des termes relatifs aux primitives en question.

☼ Enfin, l'autre originalité provient de l'aspect dissociatif inhérent à la démarche de spécification pour formaliser indépendamment la partie physique, représentant les moyens de production et leur organisation, et la partie logique, représentant les objectifs de production.

Ensuite, le développement des gammes opératoires correspond à une solution de mise en œuvre particulière de ces spécifications, à travers les relations d'accessibilité.

Cette dernière propriété permet d'offrir trois niveaux d'intervention pour la définition, l'étude et l'évaluation d'un système de production.

-1- Le premier niveau correspond à la conception d'un système inexistant. Partant d'un ensemble d'objectifs de production, on peut définir une partie physique portant sur un ensemble de composantes comportementales, sans a priori sur la structure des ressources, et une certaine organisation répondant à des critères prédéfinis d'efficacité.

On peut ainsi adopter une approche permettant de définir progressivement le système final. A partir d'une définition fonctionnelle générale du style "stockage puis traitement ou transfert", on peut affiner la définition structurelle et fonctionnelle de chaque ressource pour tester une solution matérielle particulière.

Différentes solutions peuvent être, ainsi, envisagées et évaluées pour le transport (convoyeur, chariots ou autre) pour choisir (type et nombre), ensuite, une solution matérielle satisfaisante.

Les deux autres niveaux peuvent être considérés éventuellement communs, étant relatifs à la modification d'un système déjà existant.

-2- On peut envisager la fabrication d'un nouveau type de produit sans remettre en cause l'existant, c'est à dire avec les mêmes organes de commande et les mêmes moyens de production. L'aspect modulaire du système de pilotage joue alors, dans ce cas, un rôle important. La notion de gamme répond parfaitement à cette exigence, puisque la définition et l'intégration d'une nouvelle gamme opératoire ne change aucunement les autres gammes déjà définies.

-3- Le dernier niveau concerne la modification de la partie procédé par extension du parc existant. Ce genre de modification peut être nécessité pour la modernisation du procédé concernant un type de production déjà existant, ou d'extension de la production pour la fabrication de nouveaux produits.

L'approche proposée utilise conjointement la démarche présentée, pour un système inexistant au niveau de son extension, et la démarche présentée, pour un système existant pour intégrer les ressources déjà définies et communes à l'ensemble des gammes.

Ce côté dissociatif, conjugué à l'aspect systématique, inhérent à la génération des gammes opératoires, donne donc, la possibilité de modéliser et d'évaluer un ensemble de solutions assez rapidement.

Cela permet d'effectuer, assez aisément, certaines modifications concernant l'aspect physique et/ou l'aspect logique, sans remettre en cause la totalité du système, et ainsi de tester plusieurs configurations et combinaisons de ces deux aspects.

## **Perspectives**

☼ La principale évolution nécessaire, à l'heure actuelle, est l'intégration, au niveau de l'outil support de la méthode, des blocs et des étapes manquantes à la démarche globale pour obtenir un premier modèle suffisamment complet pour une validation par simulation.

Ces différents points complémentaires (figure II-2-8) à la démarche présentée dans ce mémoire, sont en cours d'étude (Chap.II, Par.II-5).

Ils concernent notamment la phase de spécification et la phase de conception détaillée.

-1- Pour l'étape de spécification, la description des règles décisionnelles relatives aux différentes stratégies de pilotage, pour la mise en œuvre d'un ordonnancement temps réel (résolution des conflits et des indéterminismes directionnels), doit être effectuée.

Ces règles expriment, en fait, une certaine politique à travers un ensemble de mécanismes ou d'heuristiques permettant la résolution des éventuels indéterminismes directionnels (flexibilité de choix des machines et de routage) et des éventuels conflits (allocation et accès).

Elles permettront une validation par simulation hors-ligne, c'est à dire en tenant compte de manière statique des impératifs émanant des niveaux supérieurs de gestion (planification/ordonnancement) par l'intermédiaire de ces règles décisionnelles.

-2- L'étape de conception détaillée concerne le développement des gammes opératoires (étendues) par définition et intégration, d'une part, des graphes de configuration et de coopération.

D'autre part, il faut intégrer, au sein du graphe complet, les contraintes de capacité, de disponibilité et d'accès relatives aux différentes ressources de production.

☼ Un autre point important, concernant l'aspect visualisation graphique au sein de l'outil support est à considérer. En effet, la définition et le développement de modules graphiques pré-définis sont nécessaires pour visualiser le modèle à des niveaux de détail intermédiaires.

La représentation de ces modules est relative à la structure des différents graphes de transfert ainsi que des différents graphes de configuration et de coopération.

Notons qu'une génération assistée de synoptiques, constitués d'icônes définies à partir d'un éditeur spécialisé sous AIDA, est en cours d'étude. Chaque synoptique correspondra à une représentation synthétique et concise, en simulation, de l'évolution de l'état du procédé (suivi des produits et des moyens).

✿ Ensuite, les autres évolutions portent, d'abord, sur la spécification des modes de fonctionnements et sur leur intégration au sein de la commande, pour caractériser le passage d'une production à une autre (types de produits et ratios respectifs). L'objectif est l'élaboration d'un gestionnaire permettant une réorganisation et une reconfiguration systématiques du système de commande.

✿ Enfin, le dernier point concerne la phase d'implantation, pour laquelle la définition d'une architecture informatique de gestion/contrôle de référence, relative à l'organisation des organes informatiques à travers une architecture de communication (réseaux), est en cours d'étude.

Cette architecture de référence devrait permettre, par rapport à un cadre générique d'intégration, de supporter toute architecture spécifique suivant une approche systémique, c'est à dire par rapport à une architecture distribuée et découpée en plusieurs couches.

Ces différentes évolutions définissent, à l'heure actuelle, les principales préoccupations du LAIL, concernant l'aspect commande, dans le cadre du projet CASPAIM.

## BIBLIOGRAPHIE

- /ALA86/ P. ALANCHE, P. LHOSTE, G. MOREL, M. RÆSCH, M. SALIM, P. SALVI  
"Application de la modélisation de la partie opérative à la structuration de la commande"  
Congrès AFCET, Montpellier 1986.
- /ALA88a/ P. ALANCHE  
"Les automatismes et leur CAO"  
Editions Hermes, Collection Technologies de pointe N°12, 1988.
- /ALA88b/ P. ALANCHE  
"Automatiser l'automatisation"  
Revue d'Automatique et de Productique Appliquées, Vol. 1 n°2 pp 7-14, 1988.
- /AMA90/ S. AMAR, E. CASTELAIN, J.C. GENTINA  
"Modélisation des moyens de productions par langages orientés objet en vue de la conception de la commande d'un système de production flexible"  
Congrès CIM90, Proc. pp 323-331, Bordeaux 12-14 juin 1990.
- /AMA92a/ S. AMAR, E. CRAYE, J. C. GENTINA  
"Une méthode hiérarchique de spécification et de prototypage des systèmes de production flexibles"  
Revue RAIRO APII, Vol. 26, n°5-6, pp.483-514, 1992.
- /AMA92b/ S. AMAR, E. CRAYE, J. C. GENTINA  
"A method of hierarchical specification and prototyping of FMS"  
Congrès IEEE ETFA92, Proc. pp.44-49, Melbourne, 11-14 Août 1992.
- /ANA87/ Y. ANAKOK  
"Une méthode d'analyse et de synthèse de la partie commande des systèmes automatisés de production"  
Thèse de Docteur Ingénieur, ISMCM Saint-Ouen.
- /AND91/ C. ANDRE, L. FANCELLI  
"Etude d'une réalisation mixte d'un système temps réel"  
Revue RAIRO APII, Vol 25, n°2, pp 109-140, 1991.
- /AUG87/ P. AUGER  
"Une méthodologie intégrée d'aide à la conception des systèmes de fabrication"  
Thèse de Docteur Ingénieur, Université de Lille 1, 1987.
- /AUS92/ C. AUSFELDER, E. CASTELAIN, J.C. GENTINA  
"An object oriented simulation tool to validate the dynamic behaviour of Flexible Manufacturing System"  
Congrès ESM92, Proc. pp 528-532, York (UK), 1992.
- /AUS93/ C. AUSFELDER, L. KERMADE, J.P. MAIK, J.C. GENTINA  
D. DELFIEU, R. MOISAND, A.E.K. SAHRAOUI  
"Integration of operating modes in the control of flexible manufacturing systems combining synchronous and asynchronous approaches"  
Congrès IEEE SMC93, Proc. pp 234-239 Vol.2, Le Touquet, Octobre 1993.
- /AUS94/ C. AUSFELDER  
"Contribution à la conception d'un système de conduite pour les systèmes flexibles de production manufacturière : Modélisation et validation de la commande"  
Thèse de Doctorat, Université de LILLE 1, 1994.

- /AYE90/ J. AYEL, J.P. LAURENT  
"Utilisation des techniques d'IA pour la supervision des activités de gestion de production"  
Congrès CIM90, pp 35-42, Bordeaux 12-14 juin 1990.
- /BAK90/ B. BAKO, R. VALETTE, M. COURVOISIER  
"A controlled rule-based interpreter : an application to FMS simulation"  
A.I., Simulation an planning autonome in high autonomy systems, Tucson (Arizona USA), Mars 1990.
- /BAR92/ F. BARBIER, P. JAULENT  
"Techniques orientées objet et CIM"  
Editions Eyrolles, 1992.
- /BAS92/ R. BASTIDE  
"Objets coopératifs : un formalisme pour la modélisation des systèmes concurrents"  
Thèse de Doctorat, Université Paul Sabatier de Toulouse, 1992.
- /BAY92a/ M. BAYART, H. GUEGUEN  
"Les processus dis-continus"  
Rapport du groupe de travail AFCET/SEE, 1992.
- /BAY92b/ M. BAYART, M. STAROSWIECKI  
"Smart actuators : generic functional architecture, service ans cost analysis"  
Congrès IEEE SICICI'92, Singapour, Février 1992.
- /BAY93/ M. BAYART, M. STAROSWIECKI  
"A generic functional model of smart instruments for distributed architecture"  
Congrès IMEKO TC-4, Bruxelles, Mai 1993.
- /BEL87/ G. BEL, J.B. CAVAILLÉ, D. LÉVÊQUE  
"OASYS : une nouvelle approche de la simulation des systèmes productiques"  
Journées internationales de l'informatique et de l'automatisme, USINICA, Proc. pp.37-42, Paris, 1987.
- /BEN85/ G. BENCHIMOL  
"La conception des usines de demain"  
Editions HERMES, 1988.
- /BEN86/ J. BENASSY et All  
"L'usine intégrée par ordinateur"  
Editions HERMES, 1988.
- /BER90/ J.C. BERTRAND, D. BRUN-PICARD, P. PUJO  
"CIM : vers une mise en œuvre décentralisée du Système de Production pour une meilleure intégration des fonctions de conception, production et gestion"  
Congrès CIM90, Proc. pp 199-206, Bordeaux 12-14 juin 1990.
- /BEZ84/ J. BEZIVIN  
"Simulation et Langages Orientés Objet"  
BIGRE + GLOBULE 41, Journées L.O.O., Brest 1984.
- /BLA86/ M. BLANCHARD  
"Comprendre, maîtriser et appliquer le GRAFCET"  
Editions CEPADUES, Toulouse 1986.

- /BOI91/ S. BOIS  
"Intégration de la gestion des modes de marche dans le pilotage d'un système automatisé de production"  
Thèse de Doctorat, Université de LILLE 1, 1991.
- /BON85/ R. BONETTO  
"Les ateliers flexibles de production"  
Editions HERMES, 1985.
- /BOO87/ G. BOOCH  
"Composants Logiciels Réutilisables"  
Revue Génie Logiciel & Systèmes Experts, N°9, 1987.
- /BOO91/ G. BOOCH  
"Object Oriented Design with applications"  
Benjamin/Cumming Publishing Company Inc., 1991.
- /BOU84/ A. BOURJAULT  
"Contribution à une approche méthodologique de l'assemblage automatisé : élaboration automatique des séquences opératoires"  
Thèse d'Etat, Université de Franche Comté Besançon, 1984.
- /BOU87a/ J.P. BOUREY, D. CORBEEL, E. CRAYE, J.C. GENTINA  
"Utilisation des réseaux de Petri structurés adaptatifs et colorés pour l'analyse et la synthèse du contrôle hiérarchisé de processus discontinus"  
Revue RAIRO APII, Vol. 21, n°4, pp 343-362, 1987.
- /BOU87b/ D. BOUTEILLE, et AL.  
"Les automatismes programmables"  
Editions CEPADUES, 1987.
- /BOU87c/ A. BOURJAULT, D. CHAPPE, J.M. HENRIOUD  
"Élaboration automatique des gammes d'assemblage à l'aide de réseaux de Petri"  
Revue RAIRO APII, Vol. 21 n°4, 1987.
- /BOU88a/ J.P. BOUREY  
"Structuration de la partie procédurale du système de commande de cellules de production flexibles dans l'industrie manufacturière"  
Thèse de Doctorat, Université de LILLE 1, 1988.
- /BOU88b/ J.P. BOURRIÈRES, A. CHEVILLARD  
"Modélisation des convoyeurs à transfert libres à l'aide des Réseaux de Petri"  
Revue RAPA, pp. 87-100, n°4, Editions HERMES, 1988.
- /BOU90a/ J.P. BOURRIERES  
"Contribution à la modélisation intégrée des systèmes robotisés d'assemblage"  
Thèse d'Etat, Université de Franche Comté Besançon, 1990.
- /BOU90b/ A. BOURJAULT, J.M. HENRIOUD  
"Conception des systèmes flexibles d'assemblage"  
Congrès CIM90, pp 497-504, Bordeaux 12-14 juin 1990.
- /BOU90c/ J.P. BOURRIERES, F. LHOTE  
"Modélisation hiérarchisée des tâches d'assemblage"  
Congrès CIM90, pp 505-512, Bordeaux 12-14 juin 1990.

- /BRA83/ G. W. BRAHMS  
"Réseaux de Petri : Théorie et pratique  
Tome1 : Théorie et analyse  
Tome2 : Modélisation et applications"  
Editions MASSON, Paris 1983.
- /BRO85/ J. BROWN, K.E. STECKE  
"Variations in flexible manufacturing systems according to the relevant types of  
automated material handling"  
Material Flow 2, pp.179-185, 1985.
- /CAL90/ J.P. CALVEZ  
"Spécification et conception des systèmes : une méthodologie"  
Editions MASSON, Paris 1990.
- /CAM89/ J.P. CAMPAGNE, G. CAPLAT  
"Élaboration automatique des gammes d'assemblage"  
Revue RAIRO APII, Vol. 23 n°1, pp 53-68, 1989.
- /CAR88/ J. CARLIER, P. CHRETIENNE  
"Problèmes d'ordonnancement"  
Editions Masson, Paris 1988.
- /CAR89/ B. CARRE  
"Méthodologie orientée objet pour la représentation des connaissances. Concepts  
de point de vue, de représentation multiple et évolutive d'objet"  
Thèse de Doctorat, Université de Lille I, 1989.
- /CAS87/ E. CASTELAIN  
"Modélisation et simulation interactive de cellules flexibles dans l'industrie  
manufacturière"  
Thèse de Doctorat, Université de LILLE 1, 1987.
- /CAV87/ J.B. CAVAILLE, J.M. PROTH  
"Pratique de la simulation en production discontinue"  
Conférences SIPRODIS, Editions EC2, Collection Novotique, 1987.
- /CHA89/ B. CHANDRASEKARAN, J.W. SMITH, J. STICKLEN  
"Deep models and their relation to diagnosis"  
Revue Artificial Intelligence in Medecine, Vol. 1, pp.29-40, 1989.
- /CHA91/ P. CHARPENTIER, O. GARRO, L. LOSSENT, P. MARTIN  
"Démarche de conception de systèmes automatisé de production : Application à la  
transitique"  
Revue RAPA, Vol. 4 n°2, pp.141-153, 1991.
- /CHL91/ P. CHLIQUE, Y. QUENEC'H DU, L. DOUBLE, E. LEMAIRE  
"Automatisation des processus batch"  
Colloque bilan A2RP, 15-16 janvier 1991.
- /CHO86/ C. CHOPPY, M. C. GAUDEL  
"Impact des spécifications formelles sur le développement de logiciels"  
Recueil des conférences sur la convention informatique, Tome A, pp 335-339,  
Paris, Septembre 1986.

- /CHO88/ C. CHOPPY  
"Maquettage et prototypage : panorama des outils et des techniques"  
Revue Génie Logiciel & Systèmes Experts, N°11 pp 6-13, Mars 1988.
- /CIA87/ CIAME  
"Les capteurs intelligents"  
Livre blanc, Editions CIAME, Paris 1987.
- /CIA88/ CIAME  
"Les actionneurs intelligents"  
Livre blanc, Editions CIAME, Paris 1988.
- /CIM90/ Colloque international CIM90  
"Productique & intégrations"  
Proceedings, Bordeaux 12-14 juin 1990.
- /COA91/ P. COAD, E. YOURDON  
"Object Oriented Analysis"  
Yourdon Press Computing Series, Prentice Hall, 1992.
- /COR79/ D. CORBEEL  
"Schéma de câblage et schéma de contrôle. Application à la simulation et la gestion des processus industriels"  
Thèse de Doctorat de spécialité, Lille 1979.
- /COR80/ D. CORBEEL  
"Formal description of processes systems and exeption handling"  
Mini&Micro, Proc. pp 335-339, Budapest 9-11 septembre 1980.
- /COR84/ D. CORBEEL, J.C. GENTINA, C. VERCAUTER  
"Adaptative Petri-Nets for Real-Time applications"  
Congrès IMACS Digitech'84, Patras (GRECE) 1984.
- /COR87/ D. CORBEEL, J.C. GENTINA  
"Coloured adaptative structured Petri Nets : a tool for the automatic synthesis of hierarchical control of FMS"  
Congrès IEEE Robotics and Automation, Proc. pp 1166-1173, Raleigh (USA), 31 mars-3 avril 1987.
- /CRA89/ E. CRAYE  
"De la modélisation à l'implantation automatisée de la commande hiérarchisée de cellules de production flexibles en industrie manufacturière"  
Thèse de Doctorat, Université de LILLE 1, 1989.
- /CRU91/ D. CRUETTE  
"Méthodologie de conception des systèmes complexes à événements discrets : application à la conception et à la validation hiérarchisée de la commande de cellules de production flexibles dans l'industrie manufacturière"  
Thèse de Doctorat, Université de LILLE 1, 1991.
- /DAV89/ R. DAVID, H. ALLA  
"Du Grafcet aux réseaux de Petri"  
Editions Hermes, 1989.

- /DEF86/ J. DEFRENNE  
"Modélisation de la partie opérative. Impact sur la sécurité et la maintenance des automates à évolution séquentielle"  
Thèse de Doctorat, Université de LILLE 1, 1986.
- /DEL90/ J.L. DELCUVELLERIE  
"Systèmes automatisés de production : Guide d'analyse des besoins"  
Document EXERA, ISMCM à Saint Ouen, Octobre 1990.
- /DEM79/ T. DEMARCO  
"Structured analysis and system specification"  
Yourdon computing series. YOURDON PRESS. Prentice Hall 1979.
- /DEV92/ D.S. DEVAPRIYA, B. DESCOTES-GENON, P. LADET  
"Petri Net based node structures for distributed problem solving in FMS"  
Revue CIMS, Vol. 5 n°3, pp 229-237, 1992.
- /DOU84/ G. DOUMEINGTS  
"Méthode GRAI : Méthode de conception des systèmes de productique"  
Thèse d'état en Automatique, Université de Bordeaux 1, 1984.
- /DOU90/ G. DOUMEINGTS  
"Méthodes pour concevoir et spécifier les systèmes de production"  
Congrès CIM90, Proc. pp89-103, Bordeaux 1990.
- /ELK92/ S. ELKHATTABI, D. CORBEEL, J.C. GENTINA  
"Integration of dependability in the conception of FMS"  
Congrès INCOM'92, Vol. 1, pp 249-254, Toronto (Canada), Mai 1992.
- /EST92/ P. ESTEBAN  
"Commande hiérarchisée multiniveaux. Application à la commande d'une cellule flexible d'assemblage"  
Congrès sur l'automatisation intégrée, Montréal (Canada) juin 1992.
- /FAR93/ A. FARAH  
"Une méthodologie d'implantation répartie du système de commande d'un SAP"  
Rapport interne du LAIL, Ecole Centrale de Lille, 1993.
- /FRA87/ J.P. FRACHET  
"Une introduction au génie automatique : faisabilité d'une chaîne d'outils CAO pour la conception et l'exploitation des machines automatiques industrielles"  
Thèse d'état, Université de Nancy 1, 1987.
- /FRI90/ D. FRITSCHY  
"La simulation orientée objet : nouvelles exigences en matière de simulation informatique et temporelle des flux d'un système flexible et discontinu"  
Congrès CIM90, Proc. pp.585-595, Bordeaux, 12-14 Juin 1990.
- /FRO84/ B. FROMENT, J.-J. LESAGE  
"Productique : Les techniques de l'usinage flexible"  
Editions DUNOD, 1984.
- /GAL90/ P.M. GALLOIS  
"La conduite de l'évolution : vers un management industriel synchronisé et intégré"  
Congrès CIM90, Proc. pp 21-28, Bordeaux 12-14 juin 1990.

- /GAN77/ C. GANE & T. SARSON  
"Structured Systems Analysis : Tools & Techniques"  
IST databooks, New York 1977.
- /GAS87/ P. GASPART  
"Les langages de programmation de la robotique"  
Editions HERMES, 1987.
- /GAS88/ B. GASNIER, C. VERCAUTER  
"An interactive tool for computer-aided manufacturing sequences specification"  
Congrès IFAC, Proc. pp 297-300, Swansea (UK), 11-13 juillet 1988.
- /GAS89/ B. GASNIER  
"Sur un outil interactif de spécification de gammes opératoires en production  
manufacturière"  
Thèse de Doctorat, Université de LILLE 1, 1989.
- /GAU88/ M. C. GAUDEL  
"Spécifications formelles, preuves et test du logiciel"  
Revue Génie Logiciel & Systèmes Experts, N°11 pp 14-21, Mars 1988.
- /HAM91/ S. HAMMADI  
"Une méthode d'ordonnancement minimisant les temps d'attente et de transit dans  
les systèmes de production flexibles de type job-shop"  
Thèse de doctorat, Université de Lille I, 1991.
- /HAR87/ D. HAREL  
"STATESHARTS : a visual formalism for complex systems"  
Science of Computer Programming n°8, pp.231-274, North Holland 1987.
- /HEI88/ T. HEIZERLING  
"Adaptation of the Petri-net of the pregraph designed in C.A.S.P.A.I.M. project in  
order to make the prototypage and a preliminary evaluation of the parallel  
architecture of the control in the field of C.I.M."  
Diplomarbeit TU München, Ecole Centrale de Lille (anciennement IDN), 1988.
- /HEN90/ J.M. HENRIOUD, A. BOURJAULT  
"Détermination des arbres d'assemblage"  
Revue RAIRO APII, Vol. 24 n°6, 1987.
- /HER90/ F. HERAN  
"Juste à temps et intégration des activités"  
Congrès CIM90, Proc. pp 207-214, Bordeaux 12-14 juin 1990.
- /HOL87/ D. HOLLINGER  
"Les langages orientés objets en spécification et simulation de systèmes  
productiques"  
Conférences SIPRODIS (simulation en production discontinue), 2-3 Juin 1987.
- /HUT79/ G.K. HUTCHISON  
"Flexible Manufacturing systems in the United States"  
Automation in manufacturing, 1979.
- /HUV92/ B. HUVENOIT, E. CRAYE, J.C. GENTINA  
"Élaboration de la commande de cellules flexibles dans l'industrie manufacturière"  
Conférences Canadiennes sur l'Automatisation Industrielle, Montréal (Canada),  
Août 1992.

- /HUV93/ B. HUVENOIT, E. CRAYE, J.C. GENTINA  
"Implantation oriented methodology in design control of FMS"  
Congrès COMP EURO 93, Proc. pp 125-131, Paris, 24-27 mai 1993.
- /IGL89/ IGL Technology  
"SADT : un langage pour communiquer"  
Editions EYROLLES, 1989.
- /ING88/ INGERSOLL ENGINEERS  
"L'usine intégrée"  
Editions HERMES, 1988.
- /ISM83/ ISMCM - Valoris  
"Modélisation, simulation et évolution de la partie opérative d'un système automatisé"  
Agence de l'informatique - Convention de recherche n°81/545, Mai 1983.
- /IUN92/ B. IUNG  
"Intelligence distribuée dans les processus industriels complexes"  
Thèse de Doctorat, Université de NANCY I, 1992.
- /JAU90/ P. JAULENT  
"Génie logiciel : les méthodes"  
Editions Armand Colin, Paris 1990.
- /JEN79/ R.W. JENSEN, C.C. TONES  
"Software Engineering"  
Prentice Hall International Editions 1979.
- /JEN86/ K. JENSEN  
"Coloured Petri Nets"  
Lectures Notes in Computer Science, Springer Verlag 1986.
- /JEN87/ K. JENSEN  
"Computer tools for construction, modification and analysis of Petri nets ; in Petri nets : applications and relationships to other models of concurrency"  
Advances in Petri nets 1986, Part II, L.N.C.S. n°255, Springer-Verlag, 1987.
- /KAP87/ M. KAPUSTA, J.C. GENTINA  
"Introduction to a first step of the aided design of control systems of flexible manufacturing cells"  
Congrès IEEE COMPINT - MONTECH, Proc. pp 258-262, Montréal (CANADA), 9-11 novembre 1987.
- /KAP88/ M. KAPUSTA  
"Génération assistée d'un graphe fonctionnel destiné à l'élaboration structurée du modèle de la partie commande pour les cellules de production flexibles"  
Thèse de Doctorat, Université de LILLE 1, 1988.
- /KAR88/ A. KARFIA  
"Présentation d'une base de connaissances adaptée à la modélisation par réseaux de Petri structurés du contrôle des processus de production discrétisés"  
Thèse de Doctorat, Université de LILLE 1, 1988.

- /KER92/ L. KERMAD  
"Méthode d'intégration des modes de marche dans l'exploitation et la supervision des systèmes de production"  
DEA de productique, Université de LILLE 1, 1992.
- /KER93/ L. KERMAD, C. AUSFELDER, J.P. BOUREY, E. CASTELAIN  
"Integrative approach for a functional specification of FMS control"  
Revue CIMS, Vol. 6 n°4, pp219-227, 1993.
- /KIE90/ F. KIEFER, J. J. LESAGE, G. TIMON  
"Conception intégrée des systèmes de commande en ingénierie productique : une approche multidisciplinaire appliquée au système logistique d'un atelier flexible"  
Congrès CIM90, pp251-259, Bordeaux 12-14 juin 1990.
- /LEM84/ J.L. LEMOIGNE  
"La théorie du système général, théorie de la modélisation"  
Presses Universitaires de France, Paris 1984.
- /LEM90/ J.L. LEMOIGNE  
"La modélisation des systèmes complexes"  
Afcet Systèmes, Dunod, 1990.
- /LEP89/ F. LEPAGE et autres  
"Les réseaux locaux industriels"  
Editions Hermes, 1989.
- /LES91/ J.J. LESAGE  
"Les outils de modélisation pour le cycle de vie des systèmes automatisés de production"  
Génie Automatique et production industrielle, journées de synthèse, ISMCM Saint-Ouen, 12-13 mars 1991.
- /LHO85/ P. LHOSTE  
"Exploitation Assistée par Ordinateur, EX.A.O. : proposition d'une approche méthodologique et d'outils d'assistance"  
Thèse de Doctorat, Université de NANCY I, 1985.
- /LHO93/ P. LHOSTE, B. IUNG, F. MAYER, G. MOREL  
"Reference modelling for distributed intelligent control system"  
Congrès IEEE SMC93, Proc. pp 84-89 Vol.3, Le Touquet, Octobre 1993.
- /LON92/ J. LONG, B. DESCOTES-GENON, P. LADET  
"Hierarchical and intelligent control of FMS"  
Congrès INCOM'92, pp 243-248, Toronto 25-28 mai 1992.
- /MAR88/ J. MARTINEZ, P.R. MURO, M. SILVA, S.F. SMITH, J.L. VILLARCEL  
"Merging artificial intelligence techniques and Petri-Nets for real time scheduling and control of production systems"  
Congrès IMACS, Proc. pp 559-561, Vol. 3, Paris 18-22 juillet 1988.
- /MAS89/ G. MASINI, A. NAPOLI, D. COLNET, D. LEONARD, K. TOMBRE  
"Les langages à objets"  
Editions INTER-EDITIONS, 1989.
- /MEL79/ J. MELESE  
"Approches systémiques des organisations"  
Editions Hommes et Techniques, 1979.

- /MER88/ R. MERCIER DES ROCHETTES, B. DESCOTES-GENON, P. LADET  
"Modelling and FMS control implementation"  
12<sup>ème</sup> Congrès Mondial IMACS, Proc. pp 559-561, Vol. 3, Paris 18-22 juillet 1988.
- /MEY86/ B. MEYER  
"Génie logiciel"  
Techniques de l'ingénieur, H2050, 1986.
- /MON90/ C. MONY, J.C. BOCQUET, P. GOSSET  
"Evolution des solutions d'intégration technique : vers le Feature Modelling"  
Congrès CIM90, Proc. pp 477-486, Bordeaux 12-14 juin 1990.
- /MOR87/ G.MOREL, M. RÆSCH  
"Aspects multi-langages, multi-produits"  
Journées de présentation PTA, Paris 1987.
- /MOR90a/ G. MOREL, P. LHOSTE, M. RÆSCH  
"Automatisation intégrée d'un îlot de fabrication manufacturière"  
Congrès CIM90, Proc. pp 345-354, Bordeaux 12-14 juin 1990.
- /MOR90b/ G. MOREL, F. MUNERATO, R. VOGRIG, G. RIS  
"Programmation orientée produit d'un îlot flexible de production de pièces mécaniques"  
Rapport du laboratoire CRAN de Nancy, compte rendu réunion CNRS pôle SED (G.R. Automatique, GT4), Paris, Janvier 1990.
- /MOR92/ G. MOREL  
"Contribution à l'automatisation et à l'ingénierie des Systèmes Intégrés de Production"  
Mémoire d'habilitation à diriger des recherches, Université de Nancy I, 1992.
- /OHL92/ H. OHL  
"Méthodes d'évaluation des performances des systèmes de production flexibles"  
DEA de Productique, Université de Lille I, 1992.
- /PAL91/ M. PALUDETTO  
"Sur la commande de procédés industriels : une méthodologie basée objets et réseaux de Petri"  
Thèse de Doctorat de l'Université Paul Sabatier de Toulouse, 1991.
- /PAN91a/ H. PANETTO  
"Une contribution au génie automatique : le prototypage des machines et systèmes automatisés de production"  
Thèse de Doctorat, Université de Nancy 1, 1991.
- /PAN91b/ H. PANETTO, P. LHOSTE, G. MOREL, M. ROESCH  
"SPEX : du génie logiciel pour le génie automatique"  
Revue Génie Logiciel & Systèmes Experts, N°25 pp 22-28, 1991.
- /PET80/ J.L. PETERSON  
"A note on coloured Petri-Nets"  
Information processing letters, Vol. 11, n°1, pp 40-43, 1980.
- /PRU86/ P. PRUNET, C. CAZALOT, P. LLORCA, G. DECHENAUX  
"De l'automatisation simple à l'atelier flexible avec le grafcel"  
Congrès AFCET automatique, Montpellier, Mars 1986.

- /PRU87a/ F. PRUNET, C. CAZALOT, J.L. STURLESE  
"De PIASTRE à AMI100 : Le GRAFCET en simulation"  
Conférences SIPRODIS sur la simulation en production discontinue  
Actes du séminaire pp 53-63, Paris 2-3 juin 1987  
Editions EC2 Edition, Colloques & Conseil, Collection Novotique, 1987
- /PRU87b/ F. PRUNET, J.L. STURLESE, C. CAZALOT, E. GINESTET, D. PANAGET,  
G. DECHENAU, P. LLORCA  
"Méthodologie et implantation automatique de commande d'automatisme à l'aide de  
la chaîne PIASTRE"  
Revue RAIRO APII, Vol. 21, n°4, pp 299-321, 1987.
- /PTA89/ BASEPTA  
"Modèle conceptuel"  
Document CCGA à l'ISMCM de St Ouen 1989.
- /R&II91/ Le journal ROBOTIQUE & INFORMATIQUE INDUSTRIELLE  
Numéro spécial : "Réussir un projet CIM"  
Numéro 76, Novembre 1991.
- /RAK88/ M.P. RAKOTOSON  
"Interfaçage d'un module de spécification avec le module de génération et d'analyse  
du prégraphe"  
DEA de Productique, Université de LILLE 1, 1988.
- /RAK92/ M.P. RAKOTOSON, C. VERCAUTER, J.C. GENTINA  
"Analyse des systèmes de production continus-discrets et critères de hiérarchisation  
du niveau coordination/supervision"  
Congrès AFCET-SEE ADPM'92, pp 11-22, Paris 29-30 janvier 1992.
- /RIA92/ J.C. RIAT  
"Validation par simulation d'architecture de commande d'atelier dans l'industrie de  
production manufacturière"  
Thèse de Doctorat, Université de LILLE 1, 1992.
- /ROB92/ M. ROBERT, J.L. NOIZETTE, J.M. RIVIERE, J.P. JOUANNET  
"Les capteurs intelligents dans les systèmes automatisés de production à  
intelligence distribuée"  
Congrès sur l'automatisation intégrée, Montréal (Canada) juin 1992.
- /ROC89/ C. ROCHE, J.P. LAURENT  
"Les approches objets et le langage LRO2 (KEOPS)"  
Revue TSI, Vol 8, N°1, pp21-39, 1989.
- /ROS77/ D.T. ROSS  
"Structured Analysis : A language for communicating ideas"  
IEEE Transactions on software engineering, Vol. 3, n°1, 1977.
- /ROU88/ F. ROUBELLAT  
"Une méthode et un logiciel pour l'ordonnancement temps réel d'ateliers"  
Revue RAIRO, Vol. 22, n°5, pp. 419-438, 1988.
- /SAH87/ A. SAHRAOUI  
"Contribution à la surveillance et à la commande d'ateliers"  
Thèse de doctorat, Université Paul Sabatier de Toulouse, 1987.

- /SEY89/ W. SEYFFERTH  
"An analytical approach to the fast evaluation of different configurations of flexible manufacturing systems based on the pregraph in the context of C.A.S.P.A.I.M."  
Diplomarbeit TU München, Ecole Centrale de Lille (anciennement IDN), 1989.
- /SHI89/ O.K. SHIN  
"Contribution au pilotage d'îlots flexibles d'assemblage"  
Thèse de Doctorat de l'Université de FRANCHE-COMTE, 1989.
- /STA93/ M. STAROSWIECKI  
"Distributed system supervision based on intelligent instruments"  
Congrès TOLLDIAG'93, Papier invité, Toulouse, Avril 1993.
- /TAR83/ H. TARDIEU, A. ROCHFELD et R. COLLETTI  
"La méthode MERISE : Principes et outils"  
Les éditions d'organisation, Paris 1983.
- /TAW92/ R. TAWEGOUM, E. CASTELAIN, J.C. GENTINA  
"Real time piloting of FMS"  
Third International Workshop on Project Managment and Scheduling, Como (Italie), Juillet 1992.
- /THO90/ J.P. THOMESSE  
"Les services du bus terrain FIP et l'intégration dans les systèmes automatisés"  
Congrès CIM90, Proc. pp 565-573, Bordeaux 12-14 juin 1990.
- /TIX89/ J.M. TIXADOR  
"Une contribution au génie automatique : la spécification exécutable de machines et systèmes automatisés de production"  
Thèse de Doctorat, Université de Nancy I, 1989.
- /TOG92/ A.K.A TOGUYENI  
"Surveillance et diagnostic en ligne dans les ateliers flexibles de l'industrie manufacturière"  
Thèse de Doctorat, Université de LILLE 1, 1992.
- /VAL88/ R. VALETTE, J. CARDOSO, H. ATABAKHCHE, M. COURVOISIER, T. LEMAIRE  
"Petri-NETS and Production rules for Decision levels in FMS control"  
Congrès IMACS, Proc. pp 522-524, Vol. 3, Paris juillet 1988.
- /VER91/ L. VERDIN  
"De la spécification à l'exploitation : le cycle de vie des SAP"  
Génie Automatique et production industrielle, journées de synthèse, ISMCM Saint-Ouen, 12-13 mars 1991.
- /VIL88/ J.L. VILLARRCEL, J. MARTINEZ, M. SILVA  
"GRAMAN : a graphic system for manufacturing system design"  
Congrès IMACS SMS, Proc. pp 79-84, Cetraro (Italie) 18-21 septembre 1988.
- /VOG87/ R. VOGRIG, P. BARACOS, P. LHOSTE, G. MOREL, B. SALZEMANN  
"Flexible manufacturing shop operation"  
Proceeding of Manufacturing Systems, Vol. 16, pp.43-55, 1987.
- /WAR85/ P.T. WARD, S.J. MELLOR  
"Structured Development for real-time systems"  
Yourdon computing series. YOURDON PRESS. Prentice Hall 1985.

- /WOI88/ P. WOIRET**  
"Modélisation et simulation pour l'aide à la conception des systèmes de  
convoyage"  
Thèse de Doctorat, Institut National des Sciences Appliquées de LYON, 1988.
- /YVA90/ P.A. YVARS**  
"Poste de travail du roboticien pour l'étude, la simulation et la reconfiguration des  
lignes de production flexibles dans l'industrie manufacturière"  
Thèse de Doctorat de l'Université de LILLE, 1989.

## TABLE DES MATIÈRES

## CHAPITRE I

Pages

Partie 1 - DÉFINITION, CARACTÉRISTIQUES ET ÉVOLUTION DES SYSTÈMES DE PRODUCTION .....	11
I-1- Définition des systèmes de production "discrets" .....	11
I-1-1- Notion de processus .....	11
I-1-2- Représentation d'un système de production.....	13
I-2- Automatisation .....	14
I-3- Numérisation.....	15
I-4- La productique .....	16
I-5- Concept de flexibilité.....	16
I-5-1- Définition.....	16
I-5-2- Classification des différents types de flexibilité.....	17
I-6- Les systèmes flexibles de production - typologie.....	18
I-7- Compromis productivité/flexibilité /BAR92/ /FRO84/ /BON85/.....	20
I-8- Intégration et gestion .....	21
I-8-1- Modes d'intégration /MOR92/ /R&II91/ /CIM90/.....	21
I-8-1-1- Introduction.....	21
I-8-1-2- L'approche classique de la productique .....	22
I-8-1-3- L'approche intégrée de la productique ou concept CIM - approche systémique .....	24
I-8-1-4- Conclusion.....	27
I-8-2- Îlots et Outils d'exploitation pour une production intégrée /MOR90a/ .....	27
I-8-3- Outils, méthodes et méthodologies de conception intégrée.....	28
I-8-3-1- Définitions et principes de modélisation.....	28
I-8-3-2- Méthodes et outils d'analyse et de conception.....	32
I-8-3-3- Modèles/architectures CIM de référence .....	33
I-8-3-4- Méthodologies de conception.....	34
-a- Système d'information.....	34
-b- Système décisionnel .....	34
-c- Système opérationnel .....	35
I-8-3-5- Méthodologies globales de conception .....	36
-a- Approche par la gestion globale (CIM généralisé).....	37
-b- Approche par la gestion temps réel (CIM réduit).....	37
I-8-4- Conclusion .....	38
I-9- Conclusion .....	39
Partie 2 - LE PROJET C.A.S.P.A.I.M. - GÉNÉRALITÉS.....	41
II-1- Origines et objectifs .....	41
II-2- Représentation hiérarchique et fonctionnelle d'un système de gestion/contrôle /EST92/ /DEL90/ .....	43
II-2-1- Les différents niveaux .....	43
II-2-2- Aspect planification et ordonnancement .....	44
II-2-2-1- La planification.....	44
II-2-2-2- L'ordonnancement.....	45
II-2-3- Aspect pilotage.....	45
II-2-3-1- Gestion temps réel .....	45
II-2-3-2- Système de conduite/supervision .....	45
II-2-3-3- Système de coordination .....	46
II-2-4- Aspect commande locale.....	47
II-3- Principes en conception.....	47
II-3-1- Notion de réutilisabilité.....	47
II-3-2- Cycle de développement.....	49

	<i>Pages</i>
II-3-3- Approche en prototypage /MEY86/ /CHO88/.....	50
II-3-4- Vérification et validation.....	51
II-3-5- Conclusion .....	52
II-4- Évolutions .....	53
Partie 3 - SPÉCIFICATION ET CONCEPTION PRÉLIMINAIRE .....	55
III-1- Introduction .....	55
III-2- Le cahier des charges.....	55
III-3- Les problèmes de spécification.....	56
III-4- Objectifs d'une spécification /MEY87/ /CAL90/.....	57
III-5- Spécification formelle /GAU88/ /CHO88/ /CHOP86/.....	59
III-6- Différents types de spécification .....	60
III-7- Caractéristiques d'une bonne spécification .....	60
III-8- Exploitation des spécifications - Conception préliminaire .....	61
III-8-1- Différentes possibilités.....	61
III-8-2- Expérimentation rapide .....	61
III-8-3- Analyse et développement préliminaire .....	62
III-8-4- L'approche CASPAIM .....	63
III-9- Conclusion .....	64

## CHAPITRE II

	<i>Pages</i>
Partie 1 - LE PROJET C.A.S.P.A.I.M.1 - LIMITATIONS .....	65
I-1- Représentation et modélisation.....	65
I-2- Démarche - Les différentes étapes .....	66
I-2-1- Formalisation des besoins - Élaboration des gammes opératoires.....	66
I-2-2- Conception préliminaire - Analyse des gammes opératoires et génération d'un prégraphe .....	67
I-2-3- Conception détaillée - Primitives de structuration /BOU88/.....	67
I-2-4- Validation par simulation /CAS87/ .....	69
I-2-5- Implantation /CRA89/.....	70
I-3- Principales limitations.....	70
Partie 2 - ÉVOLUTIONS - LE PROJET C.A.S.P.A.I.M.2.....	73
II-1- Principales évolutions en conception.....	73
II-2- Principe de l'approche C.A.S.P.A.I.M. 2 .....	74
II-3- Définition des concepts /AMA92a/ .....	76
II-3-1- Introduction.....	76
II-3-2- La partie logique.....	76
II-3-2-1- Les gammes logiques /CRU91/ .....	76
II-3-2-2- Les gammes opératoires /CRU91/ .....	77
II-3-2-3- Les gammes opératoires étendues.....	80
II-3-2-4- Les gammes de Transfert des Ressources Libres (TRL) /GAS89/ .....	82
II-3-2-5- Les gammes de Transfert par Lots (TL).....	83
II-3-3- La partie physique.....	84
II-3-3-1- Introduction.....	84
II-3-3-2- Relation d'accessibilité .....	84
II-3-3-3- Lieu caractéristique .....	85
II-3-3-4- Ressource complexe.....	85
II-3-3-5- Lieu caractéristique virtuel .....	86
II-4- Schéma conceptuel du système de pilotage.....	87
II-5- Les étapes de conception.....	89
II-5-1- Démarche de conception.....	89
II-5-2- Phase de spécification.....	89
II-5-2-1- Spécification de la partie logique et physique /AMA90/ /CRU91/ .....	89
II-5-2-2- Spécification de la partie décisionnelle /TAW92/.....	91
II-5-2-3- Spécification des modes de fonctionnement /KER92/ /KER93/.....	91
II-5-3- Phase d'analyse et de conception.....	91
II-5-3-1- Élaboration du gestionnaire des modes de fonctionnement - Analyse fonctionnelle /BOI91/ /KER93/ /AUS93/.....	91
II-5-3-2- Génération automatique des gammes opératoires - Analyse opérationnelle et primitives de structuration /AMA92a/ /AMA92b/.....	91
II-5-3-3- Génération des gammes opératoires étendues - primitives de commande /HUV93/ .....	92

	<i>Pages</i>
II-5-4- Phase de validation.....	92
II-5-4-1- Validation statique des gammes /CRU91/ /AUS94/ .....	92
II-5-4-2- Validation dynamique du système /AUS92/ /OHL92/.....	92
II-5-5- Phase d'implantation /HUV92/ /FAR93/ .....	93
II-6- Conclusion .....	94
<b>Partie 3 - SPÉCIFICATION FORMELLE ET GÉNÉRATION AUTOMATIQUE DES GAMMES OPÉRATOIRES.....</b>	<b>97</b>
III-1- Principe.....	97
III-2- Spécification et modélisation de l'aspect physique .....	99
III-2-1- Démarche de description.....	99
III-2-1-1- Description structurelle et fonctionnelle .....	99
III-2-1-2- Contraintes de fonctionnement .....	102
III-2-2- Bibliothèque fonctionnelle.....	103
III-2-2-1- Notion de fonction opérative .....	103
III-2-2-2- Classification des fonctions.....	103
III-2-3- Formalisme de description .....	104
III-2-4- Modélisation de la partie physique .....	105
III-2-4-1- Introduction.....	105
III-2-4-2- Notion d'objet.....	105
III-2-4-3- Représentation orientée objet .....	106
III-2-5- Conclusion .....	109
III-3- Spécification formelle et conception préliminaire de l'aspect logique .....	110
III-3-1- Formalisme de spécification de la partie logique.....	110
III-3-2- Génération automatique des gammes opératoires.....	112
III-3-2-1- Formalisme de description.....	112
III-3-2-2- Démarche de génération.....	112
III-3-2-3- Représentation des modules de transfert.....	114
III-3-2-4- Génération des gammes TRL.....	117
III-3-2-5- Génération des gammes TL.....	117
III-4- Conclusion .....	120

## CHAPITRE III

	<i>Pages</i>
Partie 1 - DESCRIPTION DÉTAILLÉE DES FONCTIONS OPÉRATIVES.....	121
I-1- Introduction .....	121
I-2- Classification fonctionnelle orientée objet .....	121
I-3- Fonctions de type 'Stockage' .....	123
I-3-1- Description du comportement global.....	123
I-3-2- Description des caractéristiques globales .....	123
I-3-2-1- Les paramètres de fonctionnement.....	123
I-3-2-2- Les variables d'état .....	125
I-3-3- Représentation arborescente.....	126
I-3-4- Le stockage "passif" .....	127
I-3-4-1- Le stockage de type "simple".....	127
I-3-4-2- Le stockage de type "entrée".....	127
I-3-4-3- Le stockage de type "sortie" .....	128
I-3-5- Le stockage "actif" .....	129
I-3-5-1- Le stockage de type "maintien".....	129
I-3-5-2- Le stockage de type "serrage" .....	131
I-3-5-3- Le stockage de type "convoyage".....	133
I-3-6- Résumé .....	141
I-4- Fonctions de type 'Mouvement' .....	144
I-4-1- Description du comportement global.....	144
I-4-2- Description des caractéristiques globales .....	144
I-4-3- Représentation arborescente.....	145
I-4-4- Le mouvement de type "positionnement".....	147
I-4-4-1- Le positionnement unitaire.....	147
I-4-4-2- Le positionnement synchrone .....	149
I-4-5- Le mouvement de type "déplacement" .....	153
I-4-5-1- Description du comportement .....	153
I-4-5-2- Description des caractéristiques .....	155
I-4-6- Résumé .....	158
I-5- Fonctions de type 'Traitement'.....	160
I-5-1- Description du comportement global.....	160
I-5-2- Description des caractéristiques globales .....	161
I-5-3- Représentation arborescente.....	163
I-5-4- Le traitement de type "transformation".....	164
I-5-5- Le traitement n-aire.....	164
I-5-5-1- Le traitement de type "agrégation" .....	164
I-5-5-2- Le traitement de type "désagrégation" .....	165
I-5-6- Résumé .....	165
I-6- Conclusion .....	165
Partie 2 - DÉMARCHE COMPLÈTE - APPLICATION À UN EXEMPLE .....	169
II-1- Outil CASPAIM - implémentation objet .....	169
II-1-1- Introduction .....	169
II-1-2- Fonctionnalités de l'outil .....	170
II-2- Présentation de l'exemple.....	172
II-3- Description de la partie logique .....	172
II-4- Description de la partie physique .....	174
II-5- Génération des gammes opératoires.....	182
II-5-1- Les différentes étapes de la démarche.....	182

	<i>Pages</i>
II-5-2- Intégration de l'aspect fonctionnel.....	183
II-5-2-1- Étape 0 - Initialisation .....	183
II-5-2-2- Étape 1 - Intégration des machines de fabrication.....	184
II-5-2-3- Étape 2 - Intégration des transitions de transfert .....	185
II-5-3- Intégration de l'aspect transitique.....	186
II-5-4- Intégration des modules de transfert .....	189
II-6- Modèle détaillé des transferts internes et gammes TRL .....	193
II-7- Conclusion .....	194

## LISTE DES FIGURES

## CHAPITRE I

- Figure I-1-1: Processus de production; 11  
Figure I-1-2: Système de production; 13  
Figure I-1-3: Compromis productivité/flexibilité; 21  
Figure I-1-4: Représentation systémique d'une activité de production; 25  
Figure I-1-5: Organisation distribuée; 26  
Figure I-1-6: Processus de conception; 30; 51  
Figure I-1-7: Les différents axes de modélisation; 31  
Figure I-2-1: Les différents niveaux de gestion/contrôle; 44  
Figure I-2-2: Processus de développement; 49  
Figure I-3-1: Effort par phase avec ou sans spécification; 58  
Figure I-3-2: Intérêt d'une spécification; 59

## CHAPITRE II

- Figure II-1-1: Décomposition d'un système de production dans CASPAIM1; 65  
Figure II-1-2: Représentation symbolique d'un traitement; 68  
Figure II-1-3: Structure interne d'un module de traitement; 68  
Figure II-1-4: Structure interne d'un module de transfert; 69  
Figure II-2-1: Représentation séparée de l'aspect opérationnel; 73  
Figure II-2-2: L'approche en analyse dans CASPAIM2; 75  
Figure II-2-3: Transfert entre deux zones opératoires; 80  
Figure II-2-4: Lieu accédant et lieu accédé; 86  
Figure II-2-5: Lieux caractéristiques virtuels; 87  
Figure II-2-6: Schéma conceptuel du système de pilotage; 88  
Figure II-2-7: Module de pilotage et de gestion d'une ressource complexe; 89  
Figure II-2-8: Démarche de conception; 90  
Figure II-3-1: Principe de spécification et de conception préliminaire; 98  
Figure II-3-10: Description d'une gamme opératoire; 112  
Figure II-3-11: Démarche de génération; 113  
Figure II-3-12: Modèle général de base; 115  
Figure II-3-13: Modèle spécifique à une ressource complexe; 116  
Figure II-3-14: Modèle élémentaire; 116  
Figure II-3-15: Gamme de transfert d'un lot; 118  
Figure II-3-16: Gamme de transfert d'un lot détaillée; 119  
Figure II-3-2: Démarche de description; 102  
Figure II-3-3: Description structuro-fonctionnelle d'une ressource; 104  
Figure II-3-4: Notion d'objet; 106  
Figure II-3-5: Base de modèles pré-définis; 108  
Figure II-3-6: Description d'une gamme logique; 110  
Figure II-3-7: Description d'un processus élémentaire; 110  
Figure II-3-8: Description d'un processus d'assemblage; 111  
Figure II-3-9: Description d'un processus avec alternative; 111

### CHAPITRE III

- Figure II-2-3: Transfert entre deux zones opératoires; 161  
Figure II-2-5: Lieux caractéristiques virtuels; 145  
Figure II-3-11: Démarche de génération; 182  
Figure II-3-12: Modèle général de base; 189  
Figure II-3-13: Modèle spécifique à une ressource complexe; 190  
Figure III-1-1: Bibliothèque fonctionnelle; 122  
Figure III-1-10: Localisation des entités; 135  
Figure III-1-11: Zones de convoyage élémentaires; 137  
Figure III-1-12: Systèmes de convoyage; 138  
Figure III-1-13: Graphe d'état d'un dispositif de convoyage; 139  
Figure III-1-14: Graphe d'état d'un dispositif de blocage pour le convoyage; 140  
Figure III-1-15: Graphe d'état d'un dispositif d'aiguillage pour le convoyage; 140  
Figure III-1-16: Classification orientée objet des fonctions de stockage; 142  
Figure III-1-17: Primitives fonctionnelles de stockage; 143  
Figure III-1-18: Représentation arborescente des fonctions de mouvement; 146  
Figure III-1-19: Graphe d'état d'un dispositif de positionnement unitaire; 149  
Figure III-1-2: Structure de stockage de type FIFO; 124  
Figure III-1-20: Dispositifs de positionnement synchrone; 151  
Figure III-1-21: Description structuro-fonctionnelle du stockeur rotatif; 152  
Figure III-1-22: Graphe d'état d'un dispositif de positionnement synchrone; 153  
Figure III-1-23: Description d'un système de transport à chariots automoteurs; 154  
Figure III-1-24: Différents types de réseau; 156  
Figure III-1-25: Graphe d'état d'un chariot; 157  
Figure III-1-26: Classification orientée objet des fonctions de mouvement; 159  
Figure III-1-27: Primitives fonctionnelles de mouvement; 158  
Figure III-1-28: Graphe d'état d'un dispositif de sécurité; 162  
Figure III-1-29: Représentation arborescente des fonctions de traitement; 163  
Figure III-1-3: Structure de stockage de type LIFO; 124  
Figure III-1-30: Graphe d'état d'un système de transformation; 164  
Figure III-1-31: Graphe d'état d'un système d'agrégation; 164  
Figure III-1-32: Graphe d'état d'un système de désagrégation; 165  
Figure III-1-33: Classification orientée objet des fonctions de traitement; 166  
Figure III-1-34: Primitives fonctionnelles de traitement; 167  
Figure III-1-4: Structure de stockage indexée; 125  
Figure III-1-5: Représentation arborescente des fonctions de stockage; 126  
Figure III-1-6: Dispositifs de maintien; 129  
Figure III-1-7: Graphe d'état d'un dispositif de maintien; 131  
Figure III-1-8: Dispositif de serrage; 132  
Figure III-1-9: Graphe d'état d'un dispositif de serrage; 132  
Figure III-2-1: Fenêtre d'accueil; 171  
Figure III-2-10: Choix des lieux de fabrication; 184  
Figure III-2-11: Flexibilité de choix des machines; 184  
Figure III-2-12: Flexibilité d'ordre des opérations; 184  
Figure III-2-13: Dissociation des transferts et traitements simultanés; 185  
Figure III-2-14: Gammes opératoires de niveau 1; 186  
Figure III-2-15: Restrictions  $r_1$  et  $r_2$ ; 187  
Figure III-2-16: Gammes opératoires de niveau 2; 188  
Figure III-2-17: Chemins de transfert; 191  
Figure III-2-18: Gammes finales; 192  
Figure III-2-19: Les graphes de transfert; 194  
Figure III-2-2: Présentation de l'atelier; 172  
Figure III-2-20: Graphes de commande; 195  
Figure III-2-21: Places de liaison; 196



- Figure III-2-3: Édition des gammes logiques; 173  
Figure III-2-4: Fenêtre d'édition d'un système physique; 175  
Figure III-2-5: Fenêtre d'édition des prototypes; 176  
Figure III-2-6a: Fenêtres d'édition des ressources d'application; 177  
Figure III-2-6b: Fenêtre d'édition des trajets; 178  
Figure III-2-7: Description des prototypes; 179  
Figure III-2-8: Description du convoyeur; 180  
Figure III-2-9: Lieux caractéristiques et relations d'accessibilité; 181