



**HAL**  
open science

## Evaluation et pilotage des flux manufacturiers : réflexions et propositions

Khaled Alkassem

► **To cite this version:**

Khaled Alkassem. Evaluation et pilotage des flux manufacturiers : réflexions et propositions. Sciences de l'ingénieur [physics]. Université Henri Poincaré - Nancy I, 2007. Français. NNT : . tel-00171059

**HAL Id: tel-00171059**

**<https://theses.hal.science/tel-00171059>**

Submitted on 11 Sep 2007

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

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

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

## Thèse

Présentée pour l'obtention du titre de

**Docteur de l'Université Henri Poincaré, Nancy I**

en Automatique, Traitement du Signal, Génie Informatique

par **Khaled ALKASSEM**

### **EVALUATION ET PILOTAGE DES FLUX MANUFACTURIERS : REFLEXIONS ET PROPOSITIONS**

Soutenue publiquement le 18/07/2007 devant le jury composé de :

Rapporteurs : M. Bernard DESCOTES-GENON      Professeur, Université Joseph FOURIER, Grenoble  
M. Samir LAMOURI      Maître de conférences, HDR, Supmeca, Paris

Examineurs : Mme. Véronique CARRE-MENETRIER Professeur, Université de Reims Champagne Ardenne,  
CReSTIC, Reims  
M. Patrick CHARPENTIER      Professeur, UHP, Nancy I (Directeur de thèse)  
M. Hervé PANETTO      Maître de conférence, HDR, UHP, Nancy I



# Remerciements

Entreprendre un travail de thèse n'est pas un travail solitaire et nécessite une collaboration entre plusieurs acteurs. Ce travail n'aurait sans doute jamais vu le jour sans la participation de certaines personnes que je souhaite remercier.

Je tiens d'abord à remercier tous les membres du jury, notamment Mme Véronique CARRE MENETRIER qui m'a fait l'honneur de le présider, M. Bernard DESCOTES-GENON et M. Samir LAMOURI qui ont accepté de rapporter mon travail et d'apporter des remarques enrichissantes. Merci également à M. Hervé PANETTO, examinateur, pour le temps qu'il m'a accordé afin de répondre à toutes mes questions et également pour les discussions très constructives et ses conseils judicieux. Enfin, merci à M. Patrick CHARPENTIER, mon directeur de thèse. Je tiens à lui exprimer ma profonde gratitude pour ses conseils et son aide qui ont permis d'effectuer cette thèse.

Un grand merci à Monsieur Alain RICHARD, directeur du Centre de Recherche en Automatique de Nancy, qui était toujours disponible et à l'écoute, Monsieur Gérard MOREL, le directeur adjoint, Monsieur Thierry DIVOUX, responsable du groupe thématique « Système de Production Ambiants » sans oublier de remercier M. Francis LEPAGE le directeur de l'école doctorale.

Je pense aussi à tous mes amis. J'espère que tous ceux (toutes celles) qui m'ont accompagné par leur accueil, leur présence, leurs mails, leurs discussions, leur sourire, leur générosité, leur patience, leur soutien, trouvent dans ces quelques lignes toute ma gratitude et mon amitié sans que je n'aie besoin de les citer un(e) à un(e).

Finalement, une pensée spéciale et profonde est attribuée à ma famille :

- Mon père, ma mère, et mes chères sœurs qui m'ont toujours soutenu tout au long de mes études et m'ont aidé avec beaucoup d'affection et de patience.
- Ma fiancée Kinda pour son amour, sa confiance, son soutien, son encouragement et sa présence pendant les moments les plus difficiles.



# Table des matières

<b>Introduction Générale</b> .....	9
<b>Chapitre I. Premières réflexions et analyses sur les flux</b> .....	13
1 Introduction .....	15
2 Nature et échelles d'observation des flux.....	16
3 Contrôle des flux .....	17
3.1 Système contrôlé par les activités .....	18
3.2 Système contrôlé par le produit.....	19
4 Objectif de nos travaux.....	20
<b>Chapitre II. Systèmes et flux</b> .....	23
1 Introduction .....	25
2 Définitions courantes et principes généraux.....	25
2.1 Les flux en systémique.....	25
2.2 Définitions usuelles d'un flux .....	27
2.3 Principes généraux et lois contrôlant l'évolution de flux de produits.....	28
3 Approche énergétique des flux.....	29
3.1 Définition du tétraèdre d'état .....	29
3.2 Méthodologie Bond Graphs dans les systèmes manufacturiers.....	32
4 Analogie entre flux manufacturier et théorie du trafic .....	36
4.1 Diagramme fondamental dans la théorie du trafic .....	36
4.2 ... et pour les systèmes manufacturiers.....	39
5 Qualifications usuelles des flux.....	41
5.1 Variables de produits dans un flux.....	41
5.2 Variables de support(s) d'un flux.....	43
5.3 Variables du flux.....	44
6 Niveaux d'observation et de représentation des flux.....	48
6.1 Problématique .....	48
6.2 Techniques d'agrégation .....	48
7 Modélisation-Simulation en vue d'une évaluation des flux .....	50
7.1 Modélisation des flux.....	50
7.2 Méthodes de simulation de flux .....	50
8 Conclusion.....	52
<b>Chapitre III. Propositions de modèles de flux manufacturiers</b> .....	53
1 Introduction .....	55
2 Modèles conceptuels d'un flux manufacturier .....	55
2.1 Qualifications complémentaires (rang, motif, indice de fluidité) .....	55
2.1.1 Rang .....	55
2.1.2 Indice de fluidité.....	56
2.1.3 Motif.....	58

2.2	Adaptation du Tétraèdre de Paynter au flux manufacturier .....	60
2.2.1	Proposition d'une définition des variables généralisée .....	61
2.2.2	Proposition des relations entre les variables généralisées .....	62
2.2.2.1	Capacitance généralisée (Capacitance du flux).....	63
2.2.2.2	Résistance généralisée (Résistance du flux).....	64
2.2.2.3	Inductance généralisée (inductance du flux).....	65
2.2.3	Synthèse .....	65
2.3	Modèle formel d'un flux manufacturier.....	66
3	Macro-modèle de simulation de flux manufacturiers.....	68
3.1	Introduction.....	68
3.1.1	Opérateurs au niveau des objets du flux.....	68
3.1.2	Opérateurs au niveau du flux .....	69
3.2	Synthèse des opérateurs .....	70
3.2.1	Les opérateurs simples des objets du flux .....	71
3.2.2	Les opérateurs simples du flux.....	76
3.2.3	Les opérateurs composites du flux .....	79
3.2.4	Quelques exemples.....	82
3.3	Règles de construction de modèles de flux .....	83
4	Conclusion.....	87
<b>Chapitre IV Modélisation du SFP de l'AIPL (Application).....</b>		<b>89</b>
1	Introduction .....	91
2	Plateforme de validation.....	91
2.1	Présentation du SFP .....	91
2.2	La gestion des flux de produits à l'AIPL .....	93
2.3	Conclusion sur le cadre de travail du l'AIPL.....	93
3	Etude de flux dans le SFP.....	94
4	Résultats de simulation.....	102
4.1	Sans le contrôle par le flux.....	102
4.2	Avec le contrôle par le flux.....	106
4.2.1	Contrôle anticipatif.....	107
4.2.2	Contrôle Local.....	110
4.2.2.1	Cas des seuils Min/Max .....	110
4.2.2.2	Notion de seuil Max .....	114
5	Synthèse, critiques et Conclusion.....	117
<b>Conclusions Générales et Perspectives.....</b>		<b>119</b>
<b>Références Bibliographiques.....</b>		<b>123</b>
<b>Annexes .....</b>		<b>129</b>
Annexe 1. Rappel sur le formalisme NIAM/ORM .....		131
Annexe 2. Verbalisation du modèle de flux.....		135
Annexe 3. Présentation de la structure des systèmes d'information mis en place à AIPL .....		137
Annexe 4. Acquisition de données dans le SFP .....		139
Annexe 5. Bibliothèque dédiée à la modélisation du flux sous ARENA®.....		141

# Table des figures

Figure 1. Regard croisé Nature-Echelle d'observation d'un flux.....	17
Figure 2. Présentation globale du système manufacturier (approche classique).....	18
Figure 3. Boucle de contrôle par le produit (Approche SCP) [Gouyon 04].....	19
Figure 4. Structure d'entreprise selon le SCP selon [Morel et al. 03] .....	20
Figure 5. Approche flux proposé.....	21
Figure 6. Décomposition du système de production selon l'approche systémique .....	26
Figure 7. Vision synchronique et diachronique .....	26
Figure 8. Tétraèdre d'état de Paynter [Paynter 61].....	30
Figure 9. Modélisation du flux physique selon [Dembélé 93].....	33
Figure 10. Les deux niveaux de modélisation du flux selon [Dembélé 93].....	34
Figure 11. Modélisation du flux selon [Besombes et al. 97] .....	34
Figure 12. Modélisation du flux selon [Félot 97] .....	35
Figure 13. Modélisation du flux selon [Lair 00] .....	35
Figure 14. Diagramme Fondamental.....	37
Figure 15. Diagrammes Fondamentaux pour un cas de trafic routier .....	39
Figure 16. Modèle ARENA de l'exemple choisit .....	40
Figure 17. Diagrammes fondamentaux pour le cas d'un flux de produits dans une ligne de production.....	40
Figure 18. Intervalle d'espace (Space Headway) .....	42
Figure 19. Intervalle de temps (Time Headway).....	42
Figure 20. Exemple du calcul de la concentration .....	46
Figure 21. La même densité peut avoir deux positionnements différents d'objets sur le support .....	46
Figure 22. Exemple sur le calcul de l'occupation .....	47
Figure 23. Exemple indice de fluidité pour flux séries .....	57
Figure 24. Différence entre Motif et Pattern .....	59
Figure 25. Étapes du travail.....	61
Figure 26. Adaptation du tétraèdre de Paynter au cas de flux de produits [Alkassem et Charpentier 04].....	62
Figure 27. Modèle formel du flux manufacturier.....	67
Figure 28. Représentation graphique de la circulation simple .....	71
Figure 29. Représentation graphique du Transformer objet .....	72
Figure 30. Représentation graphique de l'Assemblage objets .....	73
Figure 31. Nomenclature d'assemblage du produit P3 .....	73
Figure 32. Représentation graphique du Puits objets.....	74
Figure 33. Représentation graphique du Désassemblage objets .....	75
Figure 34. Nomenclature de désassemblage de P <sub>1</sub> .....	75
Figure 35. Représentation graphique de la Source objets .....	76
Figure 36. Représentation graphique de la Convergence flux "Assemblage flux" .....	76
Figure 37. Nomenclature de convergence pour l'assemblage du flux Fass.....	77
Figure 38. Représentation graphique de la Divergence flux "Désassemblage flux".....	78
Figure 39. Nomenclature de divergence pour le désassemblage du flux F <sub>désass</sub> .....	79
Figure 40. Représentation graphique du Transformer flux .....	80
Figure 41. Exemple d'utilisation de transformer flux comme un stock tampon entre deux machines.....	81
Figure 42. Représentation graphique de la circulation composite .....	81



Figure 43. Décomposition de la circulation composite en deux opérateurs appliqués simultanément sur le flux : circulation simple et transformer flux .....	82
Figure 44. Exemple, stock à 3 tiroirs .....	83
Figure 45. Exemple, stock à n alvéoles .....	83
Figure 46. Les pièces et les produits assemblés : Exemples de pièces et de produits de type AIP .....	92
Figure 47. Système Flexible d'Assemblage .....	92
Figure 48. Synoptique du SFP .....	95
Figure 49. Schématisation du SFP .....	95
Figure 50. Schématisation du SFP modélisé par ARENA .....	96
Figure 51. L'opération de transformation des produits .....	98
Figure 52. L'opération de convergence .....	99
Figure 53. L'opération de divergence .....	100
Figure 54. La circulation .....	100
Figure 55. Relation entre le nombre de palettes et le $C_{max}$ .....	102
Figure 56. Relation entre le nombre de palettes et le flow time moyen .....	103
Figure 57. Relation entre le nombre de palettes et le nombre moyen de tours supplémentaires faits par produit .....	103
Figure 58. Diagrammes Fondamentaux (cas du SFP sans SCF) .....	105
Figure 59. Relation entre le flow time moyen et le $C_{max}$ .....	106
Figure 60. Exemple illustratif sur une partie du SFP .....	107
Figure 61. Relation Vitesse min – Flow Time, cas du contrôle anticipatif de la vitesse de convoyeur .....	108
Figure 62. Relation Vitesse min – $C_{max}$ , cas du contrôle anticipatif de la vitesse de convoyeur .....	109
Figure 63. Le nombre moyen de tours supplémentaires par produit : cas du contrôle anticipatif .....	109
Figure 64. Le Flow Time max cas du contrôle anticipatif de la vitesse du convoyeur .....	110
Figure 65. Flow Time moyen (cas des seuils Min/Max) .....	112
Figure 66. $C_{max}$ (cas des seuils Min/Max) .....	112
Figure 67. Le nombre moyen de tours supplémentaires par produit (cas des seuils Min/Max) .....	113
Figure 68. Le Flow Time max (cas des seuils Min/Max) .....	113
Figure 69. Flow Time, cas de seuil Max .....	115
Figure 70. $C_{max}$ , cas de seuil Max .....	115
Figure 71. Évolution du nombre moyen de tours suppl. par produit, cas de seuil Max .....	116
Figure 72. Flow Time Max, cas de seuil Max .....	116
Figure 73. Variance Flow Time max pour les trois scénarios de contrôle par le flux .....	117
Figure 74. Structure des systèmes d'information mise en place à l'AIP .....	137
Figure 75. Mémoire électronique de 8 K Octets .....	139
Figure 76. Acquisition de données du SFP .....	139
Figure 77. Bibliothèque Flow .....	142

# **Introduction Générale**



La mondialisation de l'économie, la concurrence accrue, la personnalisation des produits, leur durée de vie toujours plus courte, des clients exigeants et leur demande toujours plus volatile, la concentration et le poids de la grande distribution, ... sont autant de facteurs qui rendent le combat économique de plus en plus difficile et appellent des solutions innovantes et performantes rapidement.

Afin de répondre à ces nouveaux challenges un des moyens déployés concerne de nouveaux modes de fonctionnement (flux tiré, juste à temps entre autres). Ces modes mettent l'accent sur les interactions entre les différentes entités qui composent l'entreprise. Les interactions sont en général représentées et matérialisées par la notion de flux. Ce sont tout autant des flux de matières et de produits, que des flux d'informations, des flux financiers, des flux d'énergie : autant d'objets de nature très différente que l'on cherche généralement à optimiser. Si dans de nombreux domaines scientifiques le concept de flux est « relativement » bien défini, il n'en est pas forcément de même pour les flux d'objets manufacturés... Cela conduit généralement à étudier les flux de ce type soit par une forme d'agrégation des propriétés élémentaires des objets du flux, soit par le biais d'une description de type tendancielle de certaines des caractéristiques du flux. Il nous a semblé que le flux d'objets manufacturés peut être décrit plus complètement, et qu'il peut être caractérisé par des propriétés qui lui sont propres.

Cette thèse est donc une tentative dans ce sens, elle cherche à montrer l'existence d'un objet-flux par lui-même, à en définir les contours, les propriétés... Cet objet pourrait alors apparaître comme un élément central dans le cadre de nouvelles approches centrées sur le flux et son optimisation !

Le plan de ce mémoire suit la démarche que nous avons adoptée pour contribuer à cet objectif.

Le premier chapitre présente quelques réflexions et premières analyses sur les flux en général. Deux éléments particuliers y sont discutés, à savoir la nature et l'échelle d'observation des flux. Dans un second temps, deux approches pour le contrôle des flux sont présentées : la première classique est celle du contrôle par les activités, et la seconde, plus récente, et faisant l'œuvre de travaux de recherche au CRAN, est celle du contrôle par le produit. Ce chapitre nous sert à situer au final le positionnement de l'approche proposée par rapport aux deux approches précédentes.

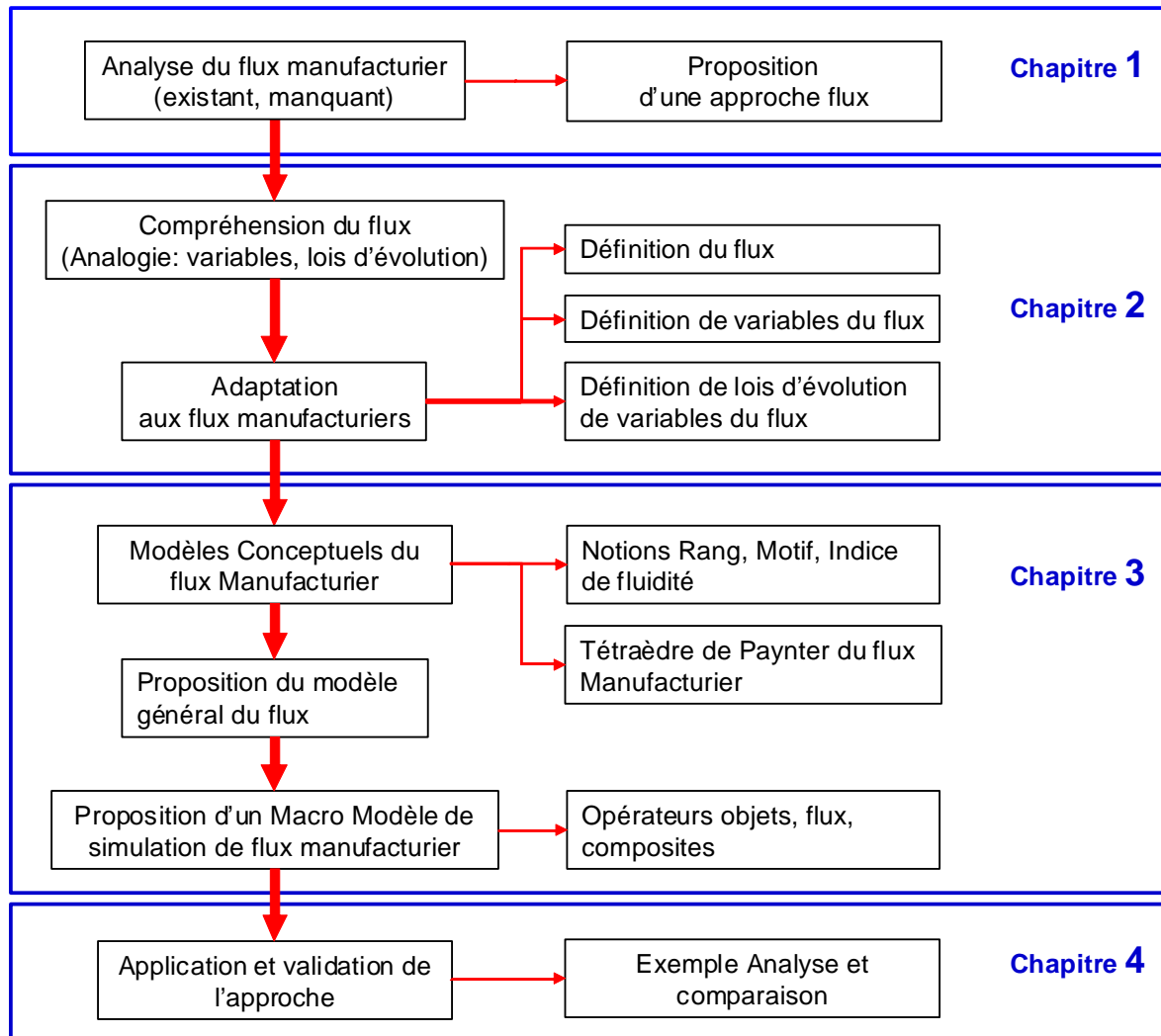
Dans le chapitre 2 nous exposons dans un premier temps des définitions courantes et les principes généraux utilisés pour l'étude des flux. Nous sommes focalisés sur deux approches jugées particulièrement intéressantes : l'approche énergétique et la théorie du trafic. En nous inspirant de ces approches et en particulier de la théorie du trafic, une liste de variables pouvant qualifier un flux à trois niveaux différents et considérés comme complémentaires est ensuite proposée. Nous reviendrons ensuite sur la problématique de représentation des flux à différents niveaux et sur les techniques d'agrégation utilisables et utilisées. Enfin, pour compléter cette caractérisation des flux, nous présenterons de manière synthétique l'aspect modélisation-simulation des flux manufacturiers en en présentant les méthodes et outils supports.

Dans le chapitre 3 nous présenterons des propositions de plusieurs ordres. La première d'entre elle se concentre sur la définition de variables ou concepts pouvant qualifier un flux d'objets hétérogènes. La seconde est une adaptation du tétraèdre de Paynter aux flux manufacturiers. Ces propositions nous permettront de proposer un modèle formel d'un flux manufacturier dans un formalisme NIAM. Enfin, la dernière proposition de ce chapitre est un macro-modèle

de simulation des flux manufacturiers où les opérateurs d'objets du flux et du flux lui-même sont présentés.

Enfin, le chapitre 4 nous servira à valider certaines des propositions précédemment établies. Le SFP (Système Flexible de Production) de l'AIPL (Atelier Inter-établissements de Productique Lorrain) nous servira de plateforme applicative pour comparer et analyser différents scénarii de contrôle de flux.

Schémas du mémoire de thèse



# **Chapitre I. Premières réflexions et analyses sur les flux**



# 1 Introduction

La notion de flux est très souvent utilisée dans des sciences très diverses : mécanique des fluides, électricité, optique... Cette notion, bien souvent une grandeur physique, y est parfaitement définie, et acceptée en l'état par la communauté scientifique concernée.

Ce même terme est devenu depuis quelques années très en vogue dans la communauté du Génie Industriel. Les préoccupations actuelles orientées sur la logistique n'y sont sans doute pas étrangères. De nombreux ouvrages y faisant explicitement référence dans leur titre [Ait Hssain 00], [Burlat et *al.* 01], [Campagne et *al.* 01], pour n'en citer que quelques uns, sont là pour en témoigner. Plusieurs raisons peuvent être évoquées pour tenter d'expliquer cette popularité récente du terme. La première est sans doute liée aux nouveaux modes décentralisés et distribués de production et à l'émergence de la logistique industrielle rendant centrale cette notion de flux. La seconde est liée à la définition même du flux qui recouvre aussi bien les aspects dynamiques que les interactions entre processeurs d'un système sur lesquels de plus en plus de travaux se focalisent. La dernière raison, sans doute la plus fondamentale, est liée à la finalité même du système de production. Son existence, son efficacité ne pouvant être perçues pour l'observateur externe que représente le client que par les flux de produits (et des services) en sortie du système de production.

Avant de présenter plus complètement nos objectifs sur cette problématique des flux et de leur gestion, il nous semble intéressant de faire un retour sur le concept même de flux. En effet, il nous semble que ce terme soit utilisé avec des sens différents selon les auteurs et leurs domaines de compétence d'origine. A la différence des sciences « classiques » évoquées précédemment, il n'existe pas de définition unanimement reconnue par tous. Il semble également, et nous tenterons de l'argumenter dans ce document, qu'un flux de produits manufacturés ne puisse se réduire à une seule grandeur physique.

Le dictionnaire [Petit Robert 07] donne la définition suivante générale d'un flux : action de couler, écoulement.

Il précise qu'en physique un flux lumineux est la quantité de lumière émise par une source lumineuse dans un temps déterminé (lumen), et qu'un flux magnétique à travers une surface est le produit du champ magnétique normal à une surface par la superficie de cette surface.

Le flux évoque donc ce qui circule, ce qui s'écoule. Sa caractérisation est liée au temps ou à la force (contrainte, champ) qu'il exerce.

De par sa nature, un flux peut donc se canaliser, se dévier, se diviser, en un mot se manipuler. Ce sont ces manipulations qui nous intéressent au premier chef afin de tenter de modeler ce flux selon des contraintes et des objectifs imposés.

Ce premier chapitre introductif, n'a pour unique ambition qu'à présenter, avant de définir nos objectifs de thèse, quelques points clés liés au concept de flux. Dans un premier temps, nous présentons une première réflexion sur la nature et l'échelle d'observation des flux, et tenterons de croiser ces deux aspects. Dans un second temps, deux principes de contrôle de systèmes manufacturiers supports de flux seront présentés et analysés. Cette analyse nous conduira dans un troisième temps à proposer une approche dans laquelle le flux joue en rôle, et devient par là même acteur de la vie d'un système industriel.



## 2 Nature et échelles d'observation des flux

L'écoulement d'un flux est lié à un ensemble de comportements individuels d'objets. Chaque objet (atome, véhicule, produit, octet, ...) dans le flux va interagir avec son environnement. Celui-ci est constitué d'autres objets du flux et de l'infrastructure de circulation. Il permet également d'explicitier la relation mutuelle entre le système et son environnement [Mayer 95].

A notre sens, une première classification des flux peut être réalisée sur la base des objets mis en mouvement :

- ceux-ci sont de même nature, les éléments du flux sont semblables et ont le même type de comportement. On qualifiera alors le flux d'homogène,
- ceux-ci sont de nature différente ou possèdent des comportements différents : le flux sera alors qualifié d'hétérogène

Cette classification n'empêche pas que, quelle que soit la nature du flux (homogène ou hétérogène), deux niveaux principaux d'observation soient classiquement utilisés dans différentes sciences [Braesch et Haurat 95] :

- un niveau microscopique où les expérimentations et les analyses portent principalement sur les interactions fondamentales s'exerçant entre constituants élémentaires du fluide,
- un niveau macroscopique où l'on cherche à expliquer le comportement global du fluide par des lois (approches de type phénoménologique).

Ces deux niveaux constituent des échelles d'observation sur lesquelles un observateur, en fonction de son statut et de ses objectifs, peut se positionner.

Les observations issues de ces deux niveaux ne sont généralement pas indépendantes, les mouvements et interactions aux petites échelles ayant des conséquences à des échelles plus larges. Ce passage simplificateur et général d'une échelle microscopique à une échelle macroscopique permet d'acquérir une compréhension globale de l'objet de l'étude, qui ne soit pas perturbée par les détails plus secondaires. Le comportement macroscopique peut dans certains cas être inféré à partir des descriptions microscopiques, sous forme de lois pour les matières homogènes et plutôt sous forme de tendances pour les matières hétérogènes. On peut également noter que, pour des matières hétérogènes, le passage d'une vision microscopique à une vision macroscopique a tendance à « dévier » la nature de la matière en la rendant implicitement plus homogène.

Les flux manufacturiers étudiés dans le cadre de ce travail de thèse sont naturellement et par essence des flux que l'on peut qualifier d'hétérogènes. Les objets mis en mouvement sont différents de par leur nature (références différentes) ou de par leur état (niveau d'avancement, de personnalisation, ...).

Il nous semble, que pour ce type de flux hétérogènes, les niveaux microscopiques et macroscopiques restent très complémentaires. L'échelle macroscopique permet d'obtenir une vision globale et tendancielle des flux sous une forme « homogénéisée ». L'échelle microscopique permettant pour sa part de ne pas gommer la diversité des objets de flux hétérogènes. Certains auteurs [Filliger 05], [Hongler et Filliger 02], [Braesch et Haurat 95], [Bourrel et Henn 02] introduisent un niveau d'échelle intermédiaire qu'ils nomment le niveau

mésoscopique (du grec *mesos* « au milieu ») qui correspond à notre sens à ces visions complémentaires de niveau micro et macroscopique.

La Figure 1 représente graphiquement notre perception d'un flux sous ce double éclairage de sa nature et de son échelle d'observation.

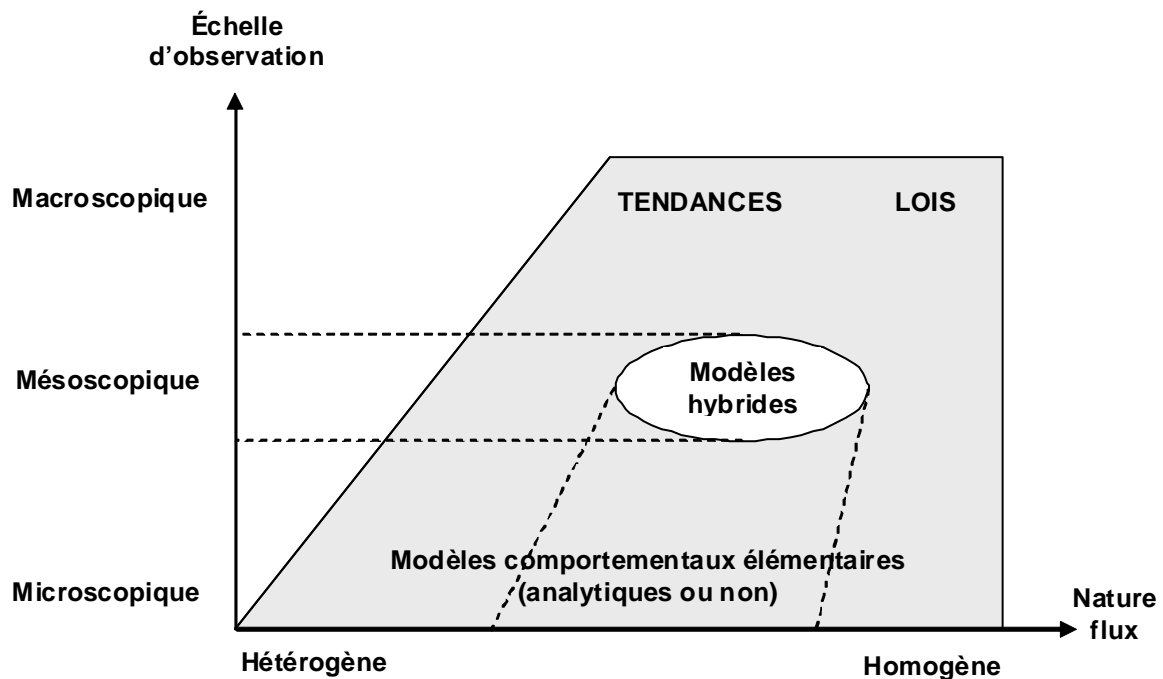


Figure 1. Regard croisé Nature-Echelle d'observation d'un flux

### 3 Contrôle des flux

Tout système de production (de services et/ou de biens) met en œuvre des flux de produits. Si l'on considère que la finalité d'une entreprise est de réaliser des produits, il n'en reste pas moins vrai que la maîtrise des flux de produits en constitue l'un des objectifs. En effet, ces flux représentent l'écoulement de la matière, depuis son état brut jusqu'à son état final.

Le flux est par nature diachronique dans le sens où il est non seulement le vecteur de l'évolution dans le temps des produits du flux, mais également parce que sa forme évolue également dans le temps (voir chapitre II).

Historiquement et de façon classique, le contrôle d'un système de production s'effectue par le biais du contrôle des activités de production et des ressources (aux sens physique du terme) auxquelles elles font appel [Lhoste 95]. Plus récemment, d'autres approches centrées sur le produit, et lui conférant un rôle d'acteur décisionnel sont apparues [Valckenaers et al. 98], [Yoshikawa dans Deen 03], [Bongaerts et al. 00], [McFarlane 03], [Morel et al. 03].

Ces deux approches, assez orthogonales l'une de l'autre, sont brièvement présentées. Notre objectif ici est de faire ressortir de ces présentations et analyses, la place du flux de produits, et au final les axes de travail sur le flux à développer.

### 3.1 Système contrôlé par les activités

Le système est piloté par le déclenchement de l'activité<sup>1</sup> (au niveau processus) et des tâches (au niveau activité). Le contrôle par les activités permet ainsi de décliner les objectifs à tous les niveaux du système de production en s'appuyant sur des indicateurs représentatifs de celles-ci. Cette approche a été développée comme une alternative à l'approche de pilotage par les coûts [Bertrand et Kieffer dans Pujo et Kieffer 02]. Cette approche repose sur le constat que tout processus de création de valeur dans le système de production peut être envisagé comme une suite d'activités consommant les ressources.

Les recherches sur ce type de contrôle ont commencé dans les années 1960 aux Etats Unis avec l'apparition de deux méthodes : la méthode ABC (Activity Based Costing) [Lebas 91], [Mevellec 90] et la méthode ABM (Activity Based Management) [Lorino 91].

La Figure 2 présente le système de contrôle relativement au système opérant. Dans cette approche, les produits et encore moins les flux, ne sont pas contrôlés directement. Ce contrôle s'effectue par le biais des ressources physiques (machines, robots, ...) qui manipulent les produits et modifient les flux. Les flux n'apparaissent qu'en tant que conséquence des différentes décisions et actions mises en œuvre. Tout comme les produits, ils ne jouent qu'un rôle très limité et passif.

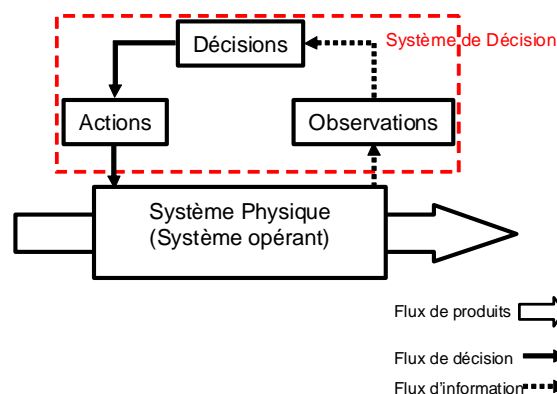


Figure 2. Présentation globale du système manufacturier (approche classique)

Le déploiement de cette approche de contrôle est souvent le résultat d'une démarche cartésienne de décomposition d'un système en sous systèmes (raffinement). Cette démarche pouvant, au besoin être complétée par une approche de type bottom-up où les éléments de contrôle élémentaires sont progressivement assemblés. L'attention des développeurs d'un tel système se porte donc plutôt sur les relations entre les constituants du système physique qu'aux attributs des produits dans le flux.

Cette approche du système contrôlé par les activités se projette relativement facilement, de par sa nature même, sur des architectures de pilotage centralisées, hiérarchisées et coordonnées [Pujo et Kieffer 02].

<sup>1</sup> Activité : c'est la transformation d'objets primaires appelés entrants en objets résultants appelés extrants à l'aide d'un ou plusieurs objets actifs dénommés ressources. Une activité correspond à la création de valeur (au sens économique), ajoutée à la valeur des intrants pour obtenir la valeur des extrants. Concepts de base de l'approche ABC-ABM [Pujo et Kieffer 02]

Le principal défaut de ce type d'approche tient au fait qu'elle contrôle les activités et les ressources nécessaires à leur mise en œuvre, et délaisse le produit objet de la production et son écoulement dans le système. Ceci génère indirectement un manque d'agilité et de flexibilité du système face aux perturbations [Duffi et Prabhu 96].

### 3.2 Système contrôlé par le produit

Cette approche est issue des travaux de l'équipe projet SCP (Système Contrôlé par le Produit). Elle postule que le produit (bien et service) peut participer activement au contrôle des processus industriels [Morel et al. 03].

L'enjeu scientifique de cette approche est d'étendre les fondements de la théorie des systèmes en général et de la modélisation des systèmes à objets discrets en particulier afin de rendre compte de l'observabilité et de la contrôlabilité de chaque (occurrence de) produit pour garantir sa traçabilité en terme de cohérence bien/information/connaissance/service. La Figure 3 montre la structure de contrôle de la production par le produit

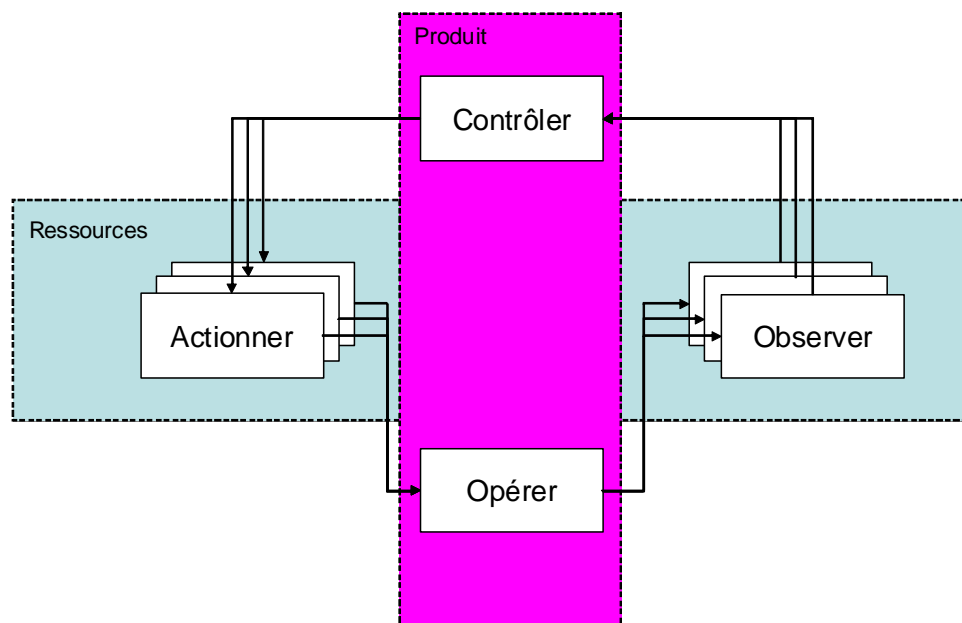


Figure 3. Boucle de contrôle par le produit (Approche SCP) [Gouyon 04]

Le produit, dans ce contexte, possède un rôle actif dans l'exécution et la gestion de sa fabrication, ce qui favorise l'adaptabilité de son système de production et positionne cette approche dans l'initiative internationale de recherche et développement IMS (Intelligent Manufacturing Systems) [Yoshikawa dans Deen 03], notamment par la proposition du paradigme HMS (Holonc Manufacturing Systems) [HMS 94], [Matthews 95], [Christensen et al. 96], [Deen 03].

Dans ce contexte de travail, [Morel et al. 03] supposent que l'entreprise est décomposée en deux univers distincts (Figure 4) :

- un univers dans lequel le produit est considéré et vu comme un objet physique “univers manufacturier”. Cet univers traite essentiellement les systèmes au niveau de l’atelier,
- un univers business dans laquelle le produit est vu comme un service réalisé par le commerce

La réalisation du produit, qui constitue l’objectif principal de l’entreprise, implique que les deux univers précédents s’échangent les informations et synchronisent leurs connaissances sur le produit. C’est donc au produit de jouer ce rôle de passerelle entre les deux univers, en devenant porteur des informations qui s’y rapportent.

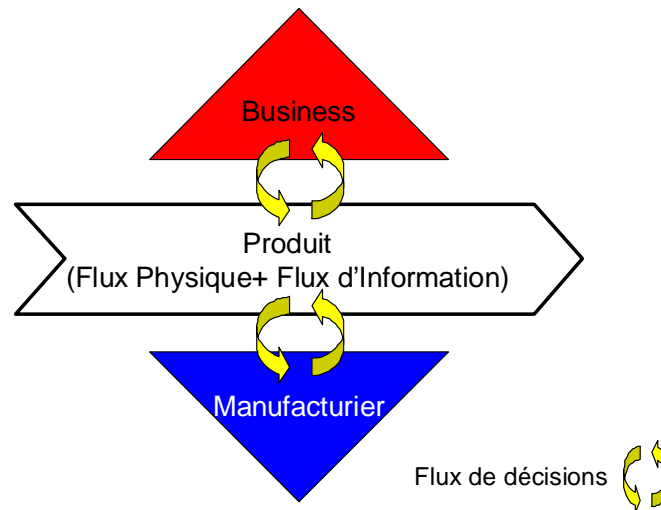


Figure 4. Structure d’entreprise selon le SCP selon [Morel et al. 03]

En fait le produit pilote la séquence des opérations exigées pour la réalisation du produit. Cette séquence définit d’autre part le trajet des objets dans le système. Mais la présentation du flux de produit pour les deux univers pourrait être incohérente puisque chacun possède sa propre vision du flux. L’évaluation de performance est faite sur des indicateurs décrivant la réalisation des opérations par les ressources (taux de rendement des ressources, taux de panne, ...). Il semble que des indicateurs propres aux flux ne soient que très rarement utilisés.

## 4 Objectif de nos travaux

Nos travaux portent sur un objet particulier : le flux. Nous nous intéressons à cet objet dans le cadre particulier des systèmes manufacturiers. La diversité et la variété des produits mis en œuvre dans ces systèmes nous conduiront à qualifier ces flux d’hétérogènes, car composés d’objets aux caractéristiques différentes. Dans les deux approches présentées précédemment (système contrôlé par les activités et système contrôlé par le produit), le flux d’objets n’apparaît que de manière très symbolique, prétexte à une représentation d’un déplacement des produits...

Notre travail de thèse consiste à étudier la possibilité de rendre le flux acteur d’un système de production. Nous partirons pour ce faire de l’hypothèse que cela est possible.

Cette hypothèse est rendue vraisemblable dans le sens où :

- le flux peut être considéré comme un objet intermédiaire observable pour des systèmes contrôlés par les activités. Il peut également, par le biais de ressources particulières dédiées spécifiquement à la « transformation » des flux être contrôlable...
- le flux peut être considéré comme objet d'intégration dans l'approche système contrôlé par le produit. Il permet en effet d'élargir la vision locale du produit (physique et informationnel) à une vision plus globale nécessaire aux approches optimisantes du contrôle des systèmes.

Le flux manufacturier apparaît dans ces deux cas comme une forme d'abstraction d'une collection d'objets-produits hétérogènes possédant des propriétés différentes. Ce flux est potentiellement caractérisable par un ensemble de variables. Il est de nature dynamique et peut être transformé tout au long de sa vie par des ressources dédiées ou non.

L'approche flux proposée peut apparaître comme un complément aux deux approches proposées précédemment. Seul l'aspect totalement distribué des décisions prises par le produit dans l'approche SCP peut être remise en cause, le niveau décisionnel flux pouvant apparaître comme un coordonnateur des produits dans le flux. La Figure 5 illustre notre concept de flux.

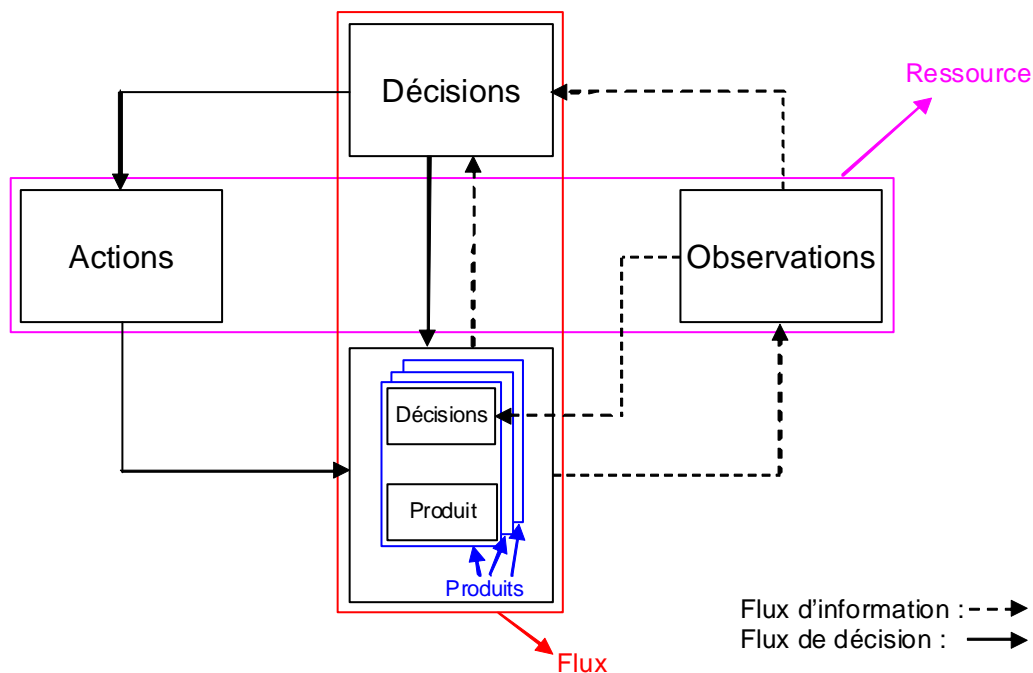


Figure 5. Approche flux proposé



# **Chapitre II. Systèmes et flux**





# 1 Introduction

La maîtrise et le contrôle des flux manufacturiers ne peuvent être réalisés sans que soit abordé et précisé le concept même de flux (positionnement dans le système, rôle, variables, ...)

L'objectif de ce chapitre est donc, par le biais d'une analyse bibliographique sur les problématiques liées aux niveaux d'observation de flux, aux techniques d'agrégation adoptées, et à la modélisation et la simulation de préciser ce concept de flux.

Nous nous appuyons également dans ce chapitre sur certaines autres sciences (mécanique des fluides, théorie du trafic, ...) où la notion de flux est importante et mieux définie que dans le cadre des systèmes manufacturiers.

## 2 Définitions courantes et principes généraux

### 2.1 Les flux en systémique

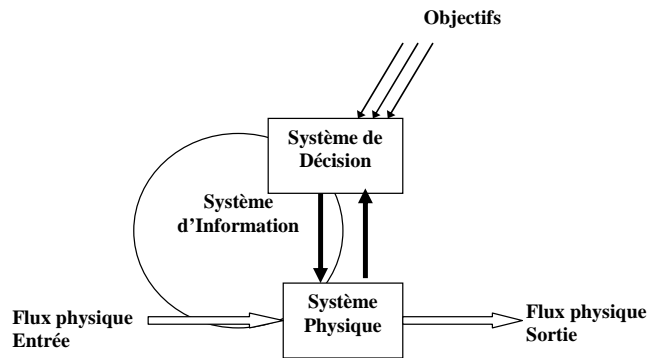
Dans la théorie du système général [Le Moigne 77], [Le Moigne 90] Jean Louis Le Moigne a défini le modèle canonique de tout système comme composé de trois sous systèmes : système physique (opérant), système d'information et système de décision (Figure 6).

Le *système physique* (ou *système opérant*) agit sur les produits en opérant des transformations, des contrôles, des stockages ou manutentions. Cet ensemble est constitué de moyens humains, physiques (machines, outils ...) et techniques (méthodes, matières, procédés de fabrication).

Le *système de décision* a pour objectif de modifier par ses décisions l'évolution du système physique. Ses critères de décision sont les suivants : le comportement du système physique, l'environnement du système et les objectifs du système.

Le *système d'information* collecte, transmet et traite les informations, que leur origine soit l'environnement du système ou qu'elles proviennent du système physique lui-même.

L'ensemble du système de décision et du système d'informations constitue le système de conduite (le système de pilotage de la production).



**Figure 6. Décomposition du système de production selon l'approche systémique**

Dans chacun de ces systèmes circulent un ou plusieurs flux. Trois types de flux sont distingués : physique, informationnel et décisionnel.

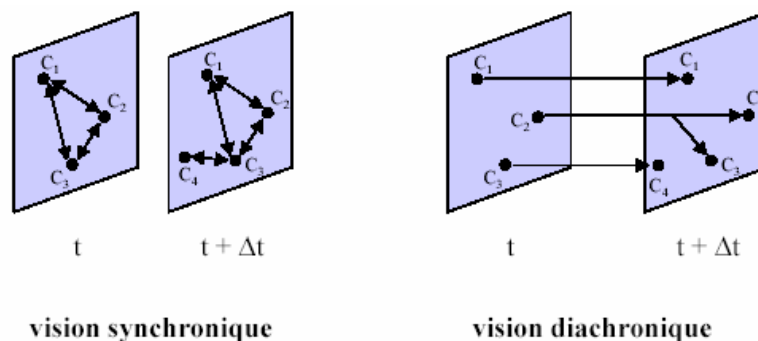
Notre travail se focalise sur le flux physique, (ou flux de produits), et les modèles de celui-ci.

Un système (physique, informationnel) est chargé de changer les caractéristiques des objets qui le traverse (matière, information), et donc changer les caractéristiques du flux. [Le Moigne 77] a défini trois opérateurs systémiques :

1. la transformation : changeant les caractéristiques de forme des objets
2. la transposition : changeant les caractéristiques d'espace des objets
3. la transtemporisation : changeant les caractéristiques de temps des objets

Ces opérateurs agissent sur les objets du flux mais également sur le flux lui-même.

Les changements ont lieu soit à des instants donnés (vision synchronique<sup>2</sup>), soient dans le temps (vision diachronique<sup>3</sup>) [Meinadier 98] (Figure 7).



**Figure 7. Vision synchronique et diachronique**

<sup>2</sup> Synchronie (avec le temps) : période ou tranche de temps, relativement brève, pendant laquelle le système peut être considéré comme maintenu à un stade donné. C'est à dire sans évolution de structure ou changement de nature

<sup>3</sup> Diachronie (à travers le temps) : échelle de temps suffisamment longue, permettant d'observer les évolution de structure ou changement de nature du système, et d'en noter les stades synchronique successifs.

## 2.2 Définitions usuelles d'un flux

Différentes définitions d'un flux sont données dans la littérature. Il nous semble donc intéressant de faire un retour sur celles-ci et le concept même de flux. Le terme " flux " est utilisé avec des sens différents selon les auteurs et leurs domaines de compétence.

De par sa nature, un flux peut se canaliser, se dévier, en un mot se manipuler. Ce sont ces manipulations qui nous intéressent au premier lieu afin de pouvoir modéliser ce flux selon des contraintes et des objectifs imposés [Charpentier 02].

Concernant le flux manufacturier plusieurs définitions sont proposées dans la littérature. Le **Tableau 1** présente un extrait de ces définitions.

Référence	Définition Originale
Dictionnaire Petit Robert	Action de couler, écouler
[Penalva 94] SAGACE	Couple (Objet, Support) où l'objet représente ce qui subit l'action du processeur et le support ce qui véhicule les objets
[Dembélé 93]	La circulation sur un réseau donné des charges isolées en quantité plus ou moins importante
[Mayer 95]	La circulation d'objets qu'ils soient matériels, informationnels ou énergétiques et qui établit les interactions entre le système et son environnement ou entre ses sous systèmes
[Quali et al. 97]	Un flux caractérise le mouvement des objets (produits) à travers les actions (actions appliquées sur les objets dans le flux)
[Bruniaux 00]	L'ensemble du circuit suivi par un article, ce circuit prend naissance dans une zone Fournisseur (produit semi-fini), et prend fin dans la zone Client (produit fini)
Fontan dans [Burlat 01]	La quantité de produit ou composants à des stades divers d'élaboration qui circulent au cours d'une période à un endroit donné du système de production
[Biteau 03]	Un flux est un déplacement d'éléments dans le temps et dans l'espace
MEGA <sup>4</sup>	Transfert d'informations, de matières, de main-d'œuvre, d'équipement, etc. entre des intervenants, donc à l'intérieur de l'entreprise ou entre des intervenants et des partenaires, donc entre l'entreprise et son environnement.
Dynamique des systèmes [Forrester 61]	La présentation du flux prend naissance au réapprovisionnement et prend fin à sa consommation
Informatique	Ensemble des données (vidéo, son, texte, etc.) qui circulent dans un réseau de télécommunication.
Télécommunication	Séquence de paquets (de trame ou de cellules) caractérisé par le protocole de niveau réseau, les adresse de source et destination et le nombre de ports source et destination

**Tableau 1. Définitions de flux**

L'analyse de ces définitions montre bien que pour avoir un flux il faut avoir les éléments suivants :

- Une **source** : pour assurer la naissance ou l'arrivée des objets dans le flux ;
- Un **puits** : pour assurer l'évacuation des objets du flux ;
- Un **ensemble d'objets** ;
- Un **support(s)** pour assurer et canaliser la circulation des objets entre la source et le puits ;

Ces éléments ne sont pas bien identifiés dans certaines définitions présentées dans le **Tableau 1**, puisque chaque définition se focalise sur un aspect précis du flux (source, puits, circulation de produits, ...) et néglige d'autres aspects moins importants selon le problème de flux abordé.

<sup>4</sup> <http://www.mega.com/index.asp/l/fr>

Dans le cas des flux manufacturiers, et plus précisément le cas de flux de produits centre d'intérêt de notre travail, nous distinguons les éléments suivants :

- **Origine** (source, entrée, début, ...)
- **Destination** (puits, sortie, fin, ...)
- **Objets du flux** (produit, composants, données, services, bien, ....)
- **Support** (réseau, route, voie, tapis, convoyeur, ...)
- **Objectif du flux** (assurer avoir le bon objet au bon moment et au bon endroit)
- **Effets du flux sur le système** (assurer le fonctionnement du système et ses liens avec l'environnement, assurer l'atteinte de la finalité du système pour laquelle il a été conçu)
- **Effets du système sur le flux** (réguler le flux et assurer sa circulation, ...)

Un flux de produits est la circulation d'un ensemble de produits entre une source, assurant l'arrivée des produits d'une part, et un puits assurant leur évacuation. Cette circulation est faite pour une finalité déterminée (approvisionnement, fabrication, distribution, ...) et est assurée par des processus de transport.

Dans un système un flux est :

- un flux interne : reliant les sous systèmes composant le système global
- un flux externe : reliant le système avec son environnement.

### **2.3 Principes généraux et lois contrôlant l'évolution de flux de produits**

L'étude des flux en général dévoile des principes et théorèmes généraux auxquels ils sont soumis :

- le principe de conservation de la masse (matière) : dans un flux le nombre de produits est conservé, en supposant qu'il n'y a pas de puits/source entre la source et le puits du flux. C'est-à-dire qu'il n'y a pas de génération ni de disparition de produits [Payne 71].
- le principe fondamental de la dynamique (de la quantité de mouvement)

Un flux physique, quelque soit sa nature, est soumis à des lois d'écoulement contrôlant ses variables principales : débit ( $q$ ), densité ( $d$ ) et vitesse ( $v$ ). Ces lois sont bâties sur le même principe que les lois de la mécanique des fluides :

$$\frac{\partial q(x,t)}{\partial x} + \frac{\partial d(x,t)}{\partial t} = 0 \quad \text{Équation de conservation de matière}$$

$$q(x,t) = d(x,t) \cdot v(x,t) \quad \text{Débit massique}$$

où  $x$  représente une coordonnée spatiale et  $t$  le temps.

Ces lois sont fondamentales dans l'étude des flux avec une vision orientée « matière ». Ces lois propres à la physique peuvent, d'une certaine façon, être remises en cause pour des modèles orientés « information ».

### 3 Approche énergétique des flux

Pour compléter et affiner la compréhension des flux de produits (comportement, phénomènes) nous proposons ici d'analyser physiquement le flux d'un point de vue énergétique en nous appuyant sur :

- les travaux de modélisation physique du flux manufacturier
- l'analogie de l'étude de flux dans d'autres domaines d'application.

La modélisation physique est devenue de plus en plus populaire pendant ces dernières années dans plusieurs domaines d'application e.g. électricité, hydraulique et énergie mécanique. Différentes méthodologies ont été développées afin de donner aux systèmes étudiés une description qualitative des phénomènes physiques et de leurs interactions. Citons parmi ces méthodologies les Bond graph [Paynter 61], le diagramme de Forrester [Forrester 61] qui ont été adaptés et utilisés pour modéliser et simuler des flux manufacturier [Dembélé 93], [Besombes et al. 97], [Lair 00], [Bruniaux 00] ...

Avant de détailler ces méthodologies, nous commençons par un petit rappel sur le tétraèdre d'état de Paynter.

#### 3.1 Définition du tétraèdre d'état

Dans ses travaux sur l'abstraction de différentes lois physiques, Paynter [Paynter 61] définit quatre variables génériques et cinq relations généralisées communes à différents domaines physiques. Elles peuvent être considérées comme éléments de base pour la définition et la modélisation des structures physiques de systèmes. Ces travaux ont abouti à la réalisation du concept de tétraèdre d'état définissant quatre variables généralisées : *Flux*, *Effort*, *Déplacement*, *Impulsion*. Pour enlever toute forme d'ambiguïté entre la variable généralisée flux et la notion du flux évoquée dans notre étude nous avons choisi de garder les noms des variables généralisées en anglais : *Flow*, *Effort*, *Displacement*, *Impulse*.

#### Variables généralisées

L'observation des nombreux phénomènes physiques permet de les décrire par des variables se référant à une quantité de substance : leurs flux, et à des forces, cause ou conséquences de ces flux. Cela nous amène à distinguer quatre variables généralisées :

- Flow généralisé ( $f$ ) : flux de masse, de volume, de charges électriques, d'entropie...
- Effort généralisé ( $e$ ) : les forces responsables ou causes, de ces flux, comme gradient de température, un potentiel électrique ou une pression.
- Displacement généralisé ( $q$ ) : défini comme l'intégrale du flux par rapport au temps. Masse, volume, charge électrique, ...

- Impulse généralisé ( $p$ ) : défini comme l'intégrale des efforts par rapport au temps. Accumulation de flux magnétique dans une bobine, accumulation de moment angulaire dans un ressort, ...

## Relations entre les variables

Deux types de relations reliant les variables généralisées sont distingués [Félicot 97] :

### a. Relations structurelles

Ces sont des relations indépendantes des notions métriques qui ne contiennent pas de paramètres, mais uniquement des coefficients sans dimension. Typiquement ce sont des relations d'équilibre et des lois de conservation (conservation de masse, conservation de l'énergie)

### b. Relations phénoménologiques

Ces relations dépendent de notions métriques et contiennent des paramètres. Leur validité est contrainte par des hypothèses opérationnelles (plage de température, de pression, ...). Deux sous classes sont distinguées :

- Relations constitutives : des relations contenant des variables d'un même domaine physique. ex. loi d'Ohm, équation entre flux thermique et variation de température, équation entre pression et volume dans un espace en hydraulique.
- Relations de couplage : des relations représentées par des contraintes entre variables relevant de plusieurs domaines physiques. Une relation entre le débit hydraulique et la vitesse mécanique d'écoulement

L'ensemble des variables généralisées et de leurs relations forme le tétraèdre d'état de Paynter (Figure 8).

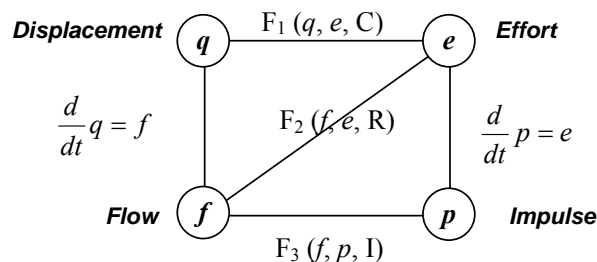


Figure 8. Tétraèdre d'état de Paynter [Paynter 61]

La définition du tétraèdre d'état permet de considérer une structure physique comme un ensemble cohérent de variables élémentaires (*Flow*, *Effort*, *Displacement*, *Impulse*) applicables aux différents domaines de la physique e.g. électrique, hydraulique, ... (Tableau 2).

<b>Système physique</b>	<b>Effort (e)</b>	<b>Flow (f)</b>	<b>Displacement (q)</b>	<b>Impulse (p)</b>
Hydraulique	Pression [N/m <sup>2</sup> ]	Débit volumique [m <sup>3</sup> /s]	Volume [m <sup>3</sup> ]	Moment de pression [N.s/m <sup>2</sup> ]
Electrique	Potentiel électrique [v]	Courant électrique [A]	Charge électrique [C=A.s]	Flux magnétique [v.s]

**Tableau 2. Les variables généralisées de Paynter appliquées au domaine de l'hydraulique et de l'électricité**

Comme le montrent les relations de couplage, une variable généralisée du tétraèdre d'état correspond toujours à une variable conjuguée, elle se retrouve toujours dans la nature associée par paires, ex, un *effort* correspond toujours à un *flow* et réciproquement ; on ne peut pas parler de tension sans intensité, ou de débit de fluide sans pression.

Ce couplage permet de définir les notions de variables Intensive et Extensive :

**Variables Intensive** : en physique et en chimie, une variable intensive est une variable qui ne dépend pas de la quantité de matière sur laquelle la mesure a portée.

Exemple de cette variable

- la pression
- la température
- potentiel électronique
- ...

**Variable Extensive** : une variable extensive est une variable qui dépend de la quantité de matières sur laquelle la mesure a portée. La valeur de cette variable est proportionnelle à la taille du système qu'elle décrit.

Exemple de ces variables :

- la masse
- le nombre de particules
- le volume (la surface, la longueur)
- ..

En physique et en chimie, une variable extensive est une variable qui dépend linéairement de la taille du système qu'il décrit<sup>5</sup> [Site web ].

Les variables liées par cette relation de couplage sont appelées des variables conjuguées. Les variables conjuguées sont définies comme un couple de deux variables vérifiant les propriétés suivantes :

- L'une est intensive et l'autre extensive
- Leur produit est homogène à une énergie

<sup>5</sup> Site web: [http://fr.wikipedia.org/wiki/Variable\\_intensive\\_et\\_variable\\_extensive](http://fr.wikipedia.org/wiki/Variable_intensive_et_variable_extensive)



Exemples :

La pression (variable intensive) est la variable conjuguée du volume (variable extensive)

La température (variable intensive) est la variable conjuguée de l'entropie (variable extensive)

La tension (variable intensive) est la variable conjuguée de la charge (variable extensive)

Le temps (variable intensive) est la variable conjuguée de la puissance (variable extensive)

La vitesse (variable intensive) est la variable conjuguée de la quantité de mouvement (variable extensive)

Puisque ces variables sont fortement liées (couplées), Paynter a proposé de considérer trois couples principaux :

- la paire (*effort, flow*) identifiée comme puissance, elle est définie par la relation F1,
- la paire (*effort, displacement*) connue comme énergie potentielle, elle est définie par la relation F2
- la paire (*impulse, flow*) connue comme une énergie cinétique, elle est définie par la relation F3.

Les variables généralisées peuvent donc être représentées par couple de variables Intensive, Extensive conjuguées (In, Ex). En mécanique, quand la variable intensive (*flow* généralisé) est la vitesse, la variable extensive (*effort* généralisé) est le poids. En électricité, la variable intensive (*effort* généralisé) est la tension électrique quand la variable extensive (*flow* généralisée) est le courant électrique.

En s'appuyant sur la présentation de cette relation de couplage les Bond Graphs ont été développés pour modéliser les systèmes physiques. Le modèle Bond Graph se situe comme un niveau intermédiaire entre le système physique et les modèles mathématiques qui lui sont associés [Tanguy 00].

En comparaison avec d'autres méthodes utilisées dans l'approche continue, par exemple le Diagramme de Forrester [Bruniaux et al. 00], le Bond Graph est proche du système physique qu'il représente de façon abstraite [Borutzky 99]. Le système est modélisé par ses deux variables généralisées (*flow, effort*). Les relations avec les autres variables peuvent être développées en s'appuyant sur les relations définies par le tétraèdre de Paynter. Enfin, le Bond Graph peut servir pour donner une interprétation des phénomènes physiques ayant lieu dans le système.

### **3.2 Méthodologie Bond Graphs dans les systèmes manufacturiers**

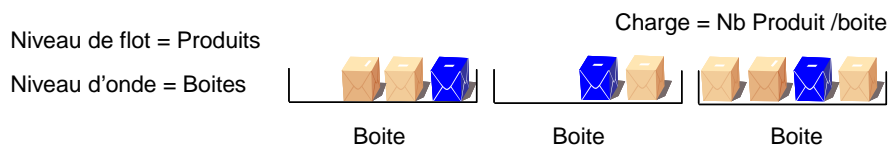
Plusieurs travaux de recherche, [Dembélé et Lhote 93], [Besombes et Marcon 93], [Lair et al. 96], [Besombes et al. 97], [Félot 97], et [Lair 00] ont trouvé un intérêt commun à utiliser ce formalisme pour modéliser les systèmes de production manufacturiers. En travaillant sur des approches différentes, ils cherchent tous à proposer un outil de modélisation afin d'étudier la

dynamique des systèmes de production et plus précisément le comportement des flux dans le système de production.

L'utilisation des Bond Graphs pour modéliser le flux manufacturier a été favorisée grâce à sa description qualitative de phénomènes physiques et leurs interactions représentées graphiquement. Nous présentons ci-dessous une synthèse de ces travaux.

Dembélé a été parmi les premiers à appliquer la méthodologie Bond Graph au domaine des systèmes de production. Il a largement axé ses travaux sur l'aspect modélisation en introduisant des éléments nouveaux à ceux existant dans Bond Graph [Dembélé et Lhote 93]. Il a proposé une modélisation du flux à deux niveaux de détail (Figure 9) :

- Modélisation d'ondes : considérant le support ou les équipements de transfert de produits (conteneurs, boîtes, ...)
- Modélisation de flot : détaillant la description des éléments (les boîtes) définis au premier niveau. Ici, il décrit non seulement le nombre de boîtes mais également le nombre de produits dans chacune de ces boîtes. Ce nombre caractérise la charge de chaque boîte définissant la notion de flot.



**Figure 9. Modélisation du flux physique selon [Dembélé 93]**

Dans chacun de ces deux niveaux Dembélé a essayé de définir les variables généralisées définissant le flux (Figure 10)

Au premier niveau les variables généralisées sont :

- le *flow* ( $f$ ) : la vitesse des boites [m/sec]
- l'*effort* ( $e$ ) : la concentration représentant le nombre de boite par mètre [boites/m]
- le *displacement* ( $q$ ) : la distance parcourue par les boites [m]
- l'*impulse* ( $p$ ) : non interprété [ ? ]

Quant au deuxième niveau, les variables généralisées sont :

- le *flow* ( $f$ ) : le débit de boites [boite/sec]
- l'*effort* ( $e$ ) : la charge de boite [produit/boite]
- le *displacement* ( $q$ ) : la distance totale parcourue par les boites [m]
- l'*impulse* ( $p$ ) : non interprété [ ? ]

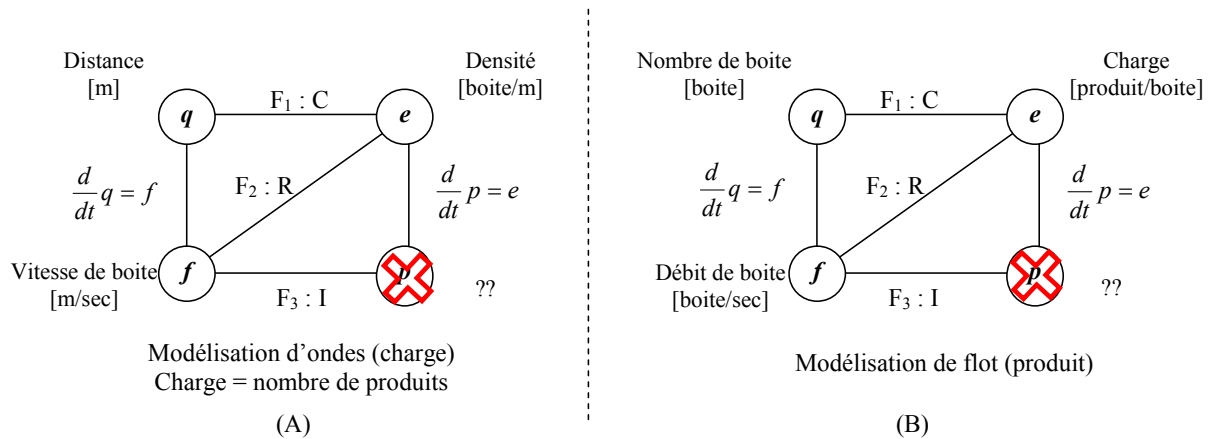


Figure 10. Les deux niveaux de modélisation du flux selon [Dembélé 93]

Cette approche permet de représenter de nouvelles variables de flux apparaissant seulement à certains niveaux de détail (e.g. nature, motif, ...), ce qui donne la possibilité de considérer la nature qualitative et quantitative du flux ainsi que le moyen d'étudier les phénomènes qui accompagnent le flux dans les deux niveaux.

Besombes a utilisé les Bond Graphs pour modéliser le système de production du point de vue technico-économique [Besombes et Marcon 93], [Besombes et al. 97]. Les modèles proposés sont basés sur des éléments standard en intégrant l'environnement économique. Dans ce contexte, ce n'est pas seulement le flux de produits qui a été pris en compte, mais également la variation du coût de production. Le coût de produit et la fréquence de production (débit de flux) sont utilisés dans ce formalisme comme les variables généralisées (*effort, flow*) (Figure 11).

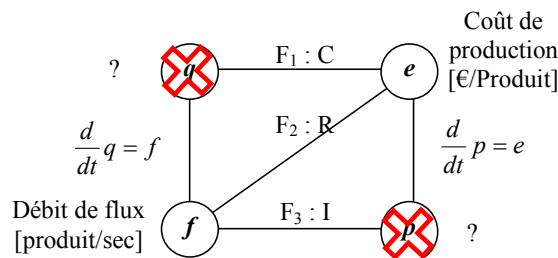


Figure 11. Modélisation du flux selon [Besombes et al. 97]

Le flux physique est donc modélisé ici par seulement une seule variable : le débit de flux, ce qui donne une représentation incomplète du flux et engendre une difficulté pour décrire l'état du système.

Plus tard le travail de Paynter a été réutilisé par Féliot pour modéliser les systèmes complexes. Dans ce travail le tétraèdre de la théorie des Bond Graphs a été utilisé pour étudier les processus physique de la transformation des systèmes complexes selon les trois références : *Espace, Temps, Forme*. Des contraintes ont été appliquées sur les entrées et les sorties des processus de flux. Les résultats de modélisation des flux physiques sont issus de la modélisation des flux d'énergie. Par conséquent, deux variables généralisées ont été définies pour caractériser le flux physique : le *flow* et le *displacement*. Elles sont respectivement représentées par le débit de flux et le nombre total de produit (Figure 12).

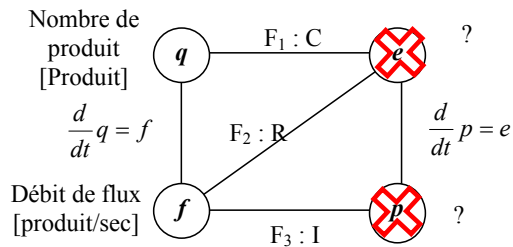


Figure 12. Modélisation du flux selon [Féliot 97]

Représenter le flux physique par seulement deux variables extensives ne définit pas bien l'équation d'état du flux, et donc tout l'intérêt de l'utilisation d'une méthodologie de type Bond Graph.

En conséquence, la représentation d'état peut être considérée comme le point de départ pour effectuer une étude complémentaire du système comme le contrôle, la stabilité ...

Dans ce contexte [Lair et al. 96] a défini le flux comme la circulation de produits (mouvement, trafic). Le problème consiste, dans un premier temps, à caractériser le trafic continu de chaque flux, puis à les relier en décrivant le traitement (modification) appliqué par la station reliant les flux.

Chacune de ces stations est composée de deux parties : stock et machine. Les entrées et les sorties de chaque station sont seulement prises en compte parce que le fonctionnement interne dépend fortement de la technologie disponible et des politiques de contrôle. Les points d'observation d'une station sont donc l'entrée de stock et la sortie de la machine.

Deux variables généralisées sont définies par Lair :

4. Le *flow généralisé* est défini comme le débit de flux.
5. L'*effort généralisé* devant représenter l'effet du débit de flux (le taux d'occupation du stock - variables sans dimension) (Figure 13).

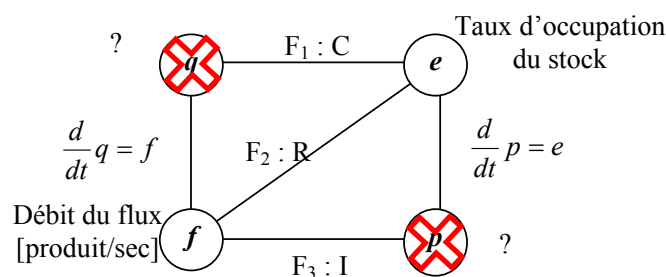


Figure 13. Modélisation du flux selon [Lair 00]

Un des points communs à l'ensemble de ces travaux réside dans le fait qu'au moins une des variables généralisées n'est pas définie. Cela mène à une description incomplète de l'état du flux physique. En conséquence, nous proposerons dans le chapitre suivant une définition de quatre variables généralisées du flux physique, pour représenter l'état du flux physique, et donc le modéliser à des fins de simulation.

## 4 Analogie entre flux manufacturier et théorie du trafic

Ces dernières années, de nombreux travaux font références à la théorie du trafic routier afin d'approfondir l'étude des flux de produits dans la "supply chain" à partir des analogies entre les types de flux de ces deux systèmes, [Chowdhury et al. 00], [Helbing 01]<sup>6</sup>, [Helbing 03], [Saidane et al. 03], [Helbing 04], [Filliger 05], [Filliger et Hongler 05].

Des nombreux phénomènes dynamiques propres au trafic routier correspondent à des phénomènes similaires dans le domaine des flux de production, citons par exemple : le blocage, la famine, le Stop and Go, ... Ces similarités trouvent leurs origines dans les interactions existantes entre les constituants présents dans les deux systèmes.

Dans le domaine du trafic routier, les interactions interviennent via les conducteurs qui tentent d'optimiser leur comportement en visant simultanément deux objectifs conflictuels à savoir, conduire rapidement et en sécurité. Dans le domaine des systèmes de production, les interactions interviennent entre les produits délivrés par les unités de production. En effet, les unités de production sont couplées via des convoyeurs et des zones de stockages dans lesquels les produits sont en interaction mutuelle. L'assèchement d'une ou plusieurs zones de stockage ou à l'opposé, leur saturation, influe directement sur la dynamique des flux et détermine les performances des systèmes de production.

### 4.1 Diagramme fondamental dans la théorie du trafic...

L'analogie avec le trafic routier fait apparaître une troisième équation (en sus à l'équation de conservation de matière et de débit massique présentées précédemment) appelée : "le diagramme fondamental" :

$$v(x,t) = v_e(d(x,t))$$

Où  $v_e$  : la vitesse d'équilibre<sup>7</sup> est la vitesse à laquelle aucun embouteillage ne se produit.

$v$  : vitesse .....

$x$  : coordonnée spatiale

$t$  : le temps

Selon cette dernière, le flux est supposé être tout le temps à l'équilibre et évoluer en passant d'un état d'équilibre à un autre. Il s'agit d'une équation empirique qui permet de caractériser l'infrastructure (le support) sur laquelle circulent les véhicules (les produits).

---

<sup>6</sup> Note : les deux références [Chowdhury et al. 00], [Helbing 01] étudient la similarité entre le trafic et les autres types des systèmes

<sup>7</sup> La vitesse d'équilibre est la vitesse à laquelle le système est à l'équilibre : c'est la situation dans laquelle tous les véhicules suivent leurs prédécesseurs à la même vitesse  $v = v_e$  [Awasthi 04]

Ce diagramme, qui a été proposé par Greenshields [Greenshields 35] suite à des mesures expérimentales, montre l'existence d'une relation entre le débit du flux et sa densité.

Un grand nombre de diagrammes ont été proposés depuis afin d'améliorer la description de l'écoulement. Tous ces diagrammes partagent certaines propriétés :

- quand la densité est proche de 0, les interactions entre les produits dans le flux sont limitées, donc ces produits circulent à leurs vitesses nominales (vitesse maximum désirée), ce qui se traduit par une borne sur la vitesse du flux, notée  $v_l$
- quand la densité augmente, les interactions entre les produits sont de plus en plus fortes, donc la vitesse diminue ;
- la densité est bornée par une certaine valeur, noté  $d_c$  (cette borne correspond aux cas limite d'un support sur lequel tous les produits sont arrêtés les uns derrière les autres)

La (Figure 14) ci-dessous présente le diagramme fondamental. Le diagramme montre que pour de faibles densités, le débit augmente simplement avec la densité de véhicules. C'est ce qui est attendu lorsque le trafic est fluide. Par contre, pour des densités plus élevées, une brisure se produit dans le diagramme : le débit diminue lorsqu'on rajoute des véhicules. C'est la formation de bouchons. Il existe donc un seuil de densité en dessous duquel le trafic est fluide et au dessus duquel les bouchons se produisent. Tout est une question de densité. A la moindre perturbation (freinage d'un conducteur ou dépassement) le bouchon se forme. Ces petites perturbations sont récurrentes sur la route. Elles impliquent une formation « spontanée » des bouchons lorsque la densité le permet. Ce phénomène est analogue à une transition de phase, référence par exemple à la solidification de l'eau lorsqu'on abaisse la température sous  $0^{\circ}\text{C}$ .

La forme générique de la figure admet la particularité d'être parabolique dans la partie du diagramme où le trafic est fluide, et linéaire dans la partie où le trafic est considéré comme saturé. Elle fait apparaître les paramètres caractéristiques d'un diagramme fondamental qui sont, outre la concentration maximale  $d_{max}$  et la vitesse libre  $v_{lmax}$  déjà présentées :

- la concentration critique  $d_c$  qui sépare les états de trafic fluide et saturé
- le débit maximum  $q_{max}$  ou capacité du tronçon étudié
- la vitesse critique  $v_c$  ou vitesse des véhicules à la concentration critique

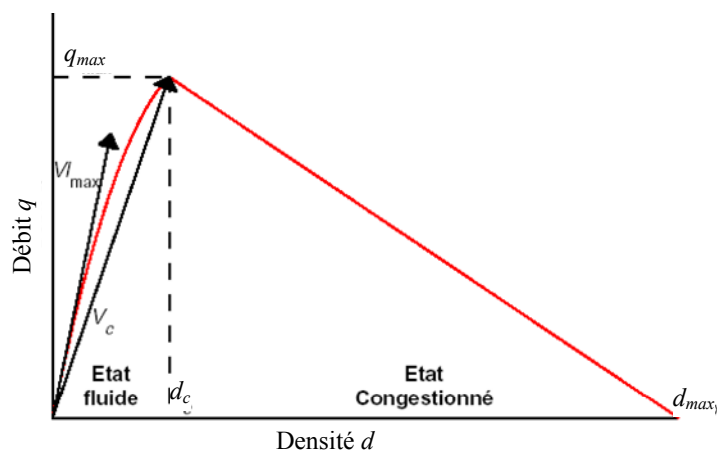


Figure 14. Diagramme Fondamental

De nombreux travaux ont été effectués, dans la seconde moitié du vingtième siècle, pour établir des relations entre les trois principales variables du flux de véhicules : débit, densité et vitesse.

Ces diagrammes montrent comment la vitesse diminue lorsque la densité augmente. On suppose que la vitesse maximum est atteinte pour une densité positive (ce qui explique la partie plate au début de la courbe), et que la densité maximum correspond à une vitesse nulle (le flux de véhicules devient un « stock » de véhicules) (Figure 15-b). Par analogie avec la théorie de la dynamique des fluides, le débit de véhicule correspond au produit de la densité et de la vitesse. Dans ces conditions, il existe un débit maximum correspondant à une certaine combinaison de vitesse et de densité.

On peut déduire de cette courbe densité-vitesse une courbe débit-vitesse (Figure 15-c) dont le profil est caractéristique : à chaque vitesse correspondent deux débits possibles, l'un en régime laminaire, lorsque le débit et la vitesse sont positivement corrélés (ce qui suppose que la densité est inférieure à la densité critique), et l'autre en régime forcé lorsqu'ils sont négativement corrélés (ce qui suppose que la densité est supérieure à la densité critique).

On peut également déduire une courbe densité-débit (Figure 15-a) : sur la première partie de la courbe la densité augmente avec le débit, et au-delà de débit max, une augmentation de la densité se traduit par une réduction du débit.

Ces relations peuvent être représentées par les équations suivantes :

La relation vitesse densité :

$$v = v_e \left(1 - \frac{d}{d_c}\right)$$

La relation débit densité

$$q = v_e \left(d - \frac{d^2}{d_c}\right)$$

La relation vitesse débit

$$q = d_c \left(v - v \frac{v^2}{v_e}\right)$$

La Figure 15 montre les diagrammes de débit-densité, vitesse-densité, et vitesse-débit développés à partir de ces équations et qui sont validés plus tard par des données de mesures directes du flux de trafic.

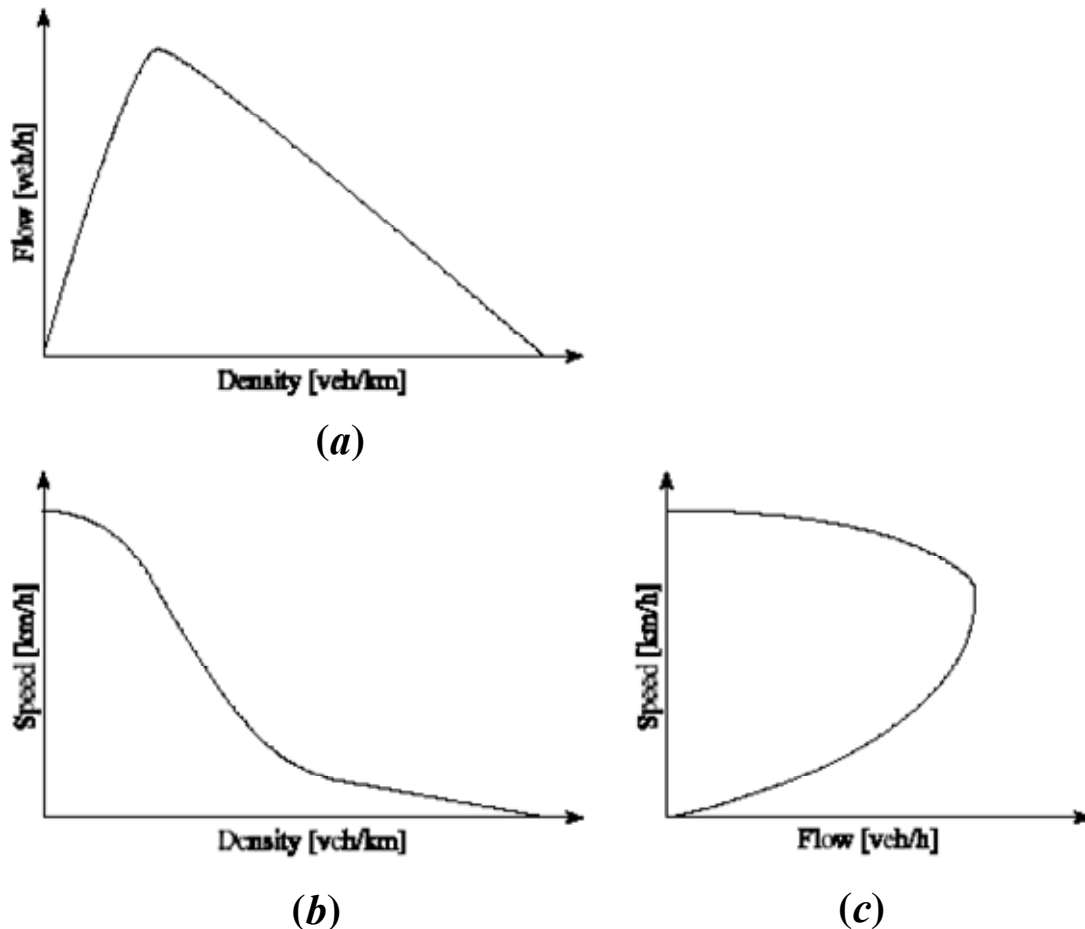


Figure 15. Diagrammes Fondamentaux pour un cas de trafic routier

Ces résultats sont analytiquement prouvés par [Filliger 05] qui a dérivé le diagramme fondamental et a développé un ensemble de modèles mathématiques permettant de caractériser la dynamique et le contrôle de flux.

## 4.2 ... et pour les systèmes manufacturiers

Dans le cadre de nos travaux, nous avons montré qu'une forme de diagramme fondamental pouvait exister dans le cas d'un flux de produits dans un système de production de type manufacturier. Un exemple simple (une ligne de production) a pour cela été étudié par simulation.

L'exemple choisit représente une ligne de production simple à deux machines ( $M_1$ ,  $M_2$ ) et à trois convoyeurs ( $C_1$ ,  $C_2$ ,  $C_3$ ) assurant la circulation des produits. La longueur de chaque convoyeur est de 1000 cm. La longueur des produits est de 40 cm. La capacité maximum de ces convoyeurs est limitée à 25 produits (notion de seuil). Le débit d'arrivée des produits est initialement de 1 produit/sec. Dès que le convoyeur dépasse le seuil défini précédemment (25 produits), il est considéré comme étant dans un état de saturation provoquant ainsi une diminution du débit d'arrivée des produits en amont du convoyeur concerné (au point d'arrivée des produits à l'entrée de la ligne, aux points de sorties des machines  $M_1$  et  $M_2$ ) (Figure 16). Le débit donc est réduit à 0,5 produits/sec et il reprend sa valeur initiale lorsque



le convoyeur n'est plus dans l'état de saturation. Nous avons simulé ce système en utilisant ARENA sur une durée de 500 Sec.

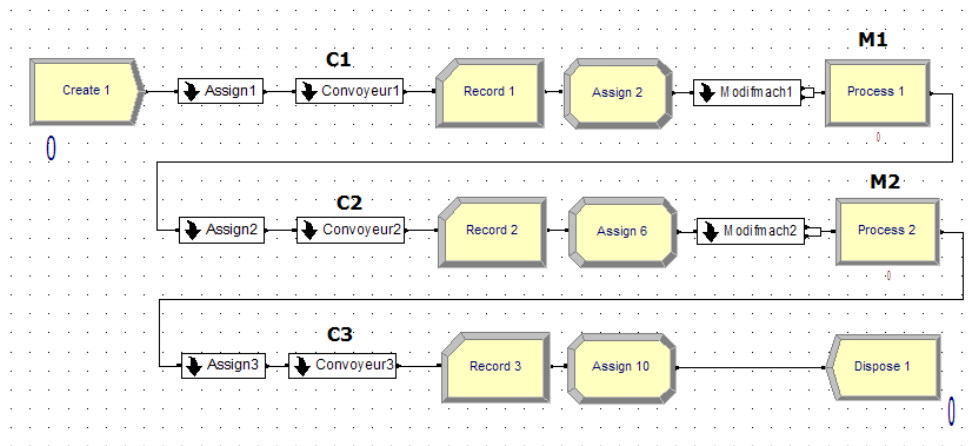


Figure 16. Modèle ARENA de l'exemple choisi

La simulation de cet exemple montre bien l'existence des relations entre les variables de flux de produits  $F_1$ ,  $F_2$  et  $F_3$  et leurs évolutions sont montrés dans (Figure 17) qui représente les diagrammes fondamentaux pour un cas de flux de produits sur la ligne de production.

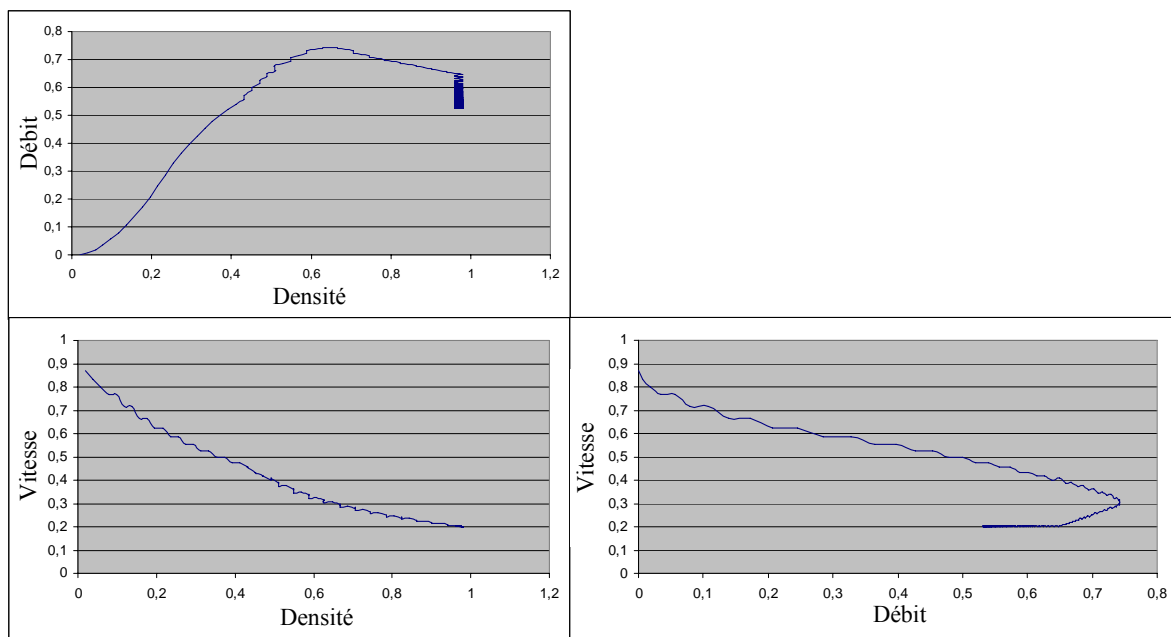


Figure 17. Diagrammes fondamentaux pour le cas d'un flux de produits dans une ligne de production

## Conclusion

Les résultats de simulation montrent bien la relation entre les variables de flux de produits. Les diagrammes formulés par ces résultats confirment notre supposition de départ. Le flux de produits semble, comme d'autres types de flux, être soumis à des lois de même type qui en contrôle son évolution.

## 5 Qualifications usuelles des flux

De manière générale, que ce soit dans une approche de type énergétique des flux, dans la théorie du trafic, ou dans toute autre approche, un flux de produits peut être caractérisé par un ensemble de variables pouvant être qualifiées de :

- *variables d'objets (de produits) du flux* : c'est l'ensemble des propriétés décrivant les aspects morphologiques du produit, ex. couleur, forme « dimension, poids, ... », et/ou décrivant le comportement du produit pendant sa circulation dans le flux, ex. vitesse, intervalle de temps, intervalle d'espace, rang, ...
- *variables de support(s) du flux* : c'est l'ensemble des variables caractérisant le support et qui ont des impacts sur le flux de produits, ex. vitesse, capacité, ...
- *variables du flux même* : c'est l'ensemble des variables qui caractérisent l'ensemble des produits (des objets) dans le flux sans les différencier, comme par exemple le débit, densité, vitesse, fluidité ... et/ou caractérisent les sous ensembles des produits dans le flux, ex. le motif ...

L'objectif de ce paragraphe est de recenser de manière la plus exhaustive possible l'ensemble de ces variables indépendamment de l'approche théorique par laquelle le problème de modélisation est abordé.

### 5.1 Variables de produits dans un flux

Nous présentons ici quelques variables du produit qui sont importantes et qui ont des impacts sur le flux et son comportement.

#### Vitesse de produit [unité de longueur/unité de temps]

C'est la distance  $L$  parcourue par le produit (l'objet) par unité de temps  $t$ . Une autre définition la représente comme la dérivée de la distance par rapport au temps, elle se calcule en divisant la distance parcourue par le temps de parcours.

$$v_i = \frac{L}{\Delta t}$$

$v_i$  : la vitesse du produit  $i$

Deux façons sont possibles pour mesurer la vitesse d'un objet :

- soit en fixant la distance  $L$  et en mesurant la durée de temps  $\Delta t$  nécessaire pour la traverser
- soit en fixant la durée de temps  $\Delta t$  et en mesurant la distance  $L$  parcourue pendant cette période.

La distance  $L$  et/ou la durée de temps sont prédéfinies en fonction du niveau d'observation du flux qui définit à son tour le niveau d'agrégation à être adopté.

### Intervalle d'espace (space headway) [unité de longueur]

La distance entre l'avant d'un produit et l'avant du produit suivant (Figure 18)

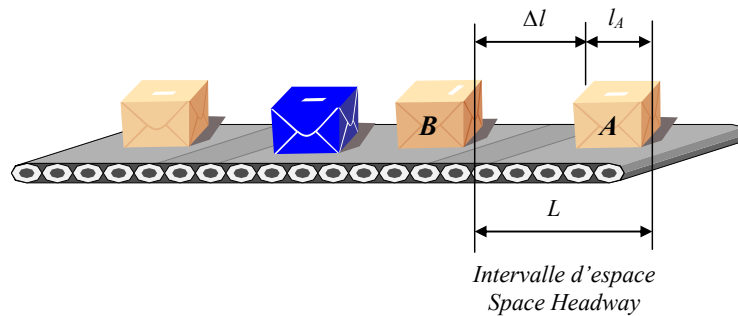


Figure 18. Intervalle d'espace (Space Headway)

$$L = l_A + \Delta l$$

$L$  : l'intervalle d'espace

$l_A$  : la longueur du produit A

$\Delta l$  : l'espace entre l'arrière d'un produit et l'avant du produit suivant

### Intervalle de temps (Time Headway) [unité de temps]

Le temps écoulé entre l'arrivée d'un produit à un emplacement particulier dans le système (un point de mesure précis, sur le support, dans le stock, ...) et l'arrivée du produit suivant au même emplacement.

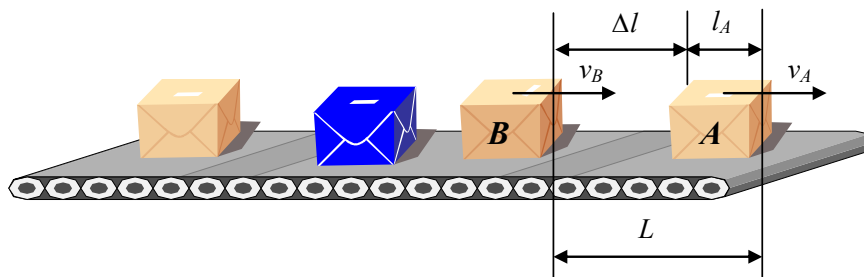


Figure 19. Intervalle de temps (Time Headway)

$$T = \frac{l_A}{v_A} + \frac{\Delta l}{v_B}$$

$T$  : L'intervalle de temps

$l_A$  : la longueur du produit A

$v_A$  : la vitesse du produit A

$\Delta l$  : l'espace entre l'arrière d'un produit et l'avant du produit suivant

Une autre présentation plus simple de cette variable est utilisée dans l'étude des flux manufacturiers, l'intervalle de temps entre deux arrivées consécutives de produits. Cette variable correspond à l'inverse d'un débit de produit.

$$T = \frac{1}{q}$$

$q$  : le débit de produit

## 5.2 Variables de support(s) d'un flux

Un support est le moyen permettant d'assurer l'opération de transport des produits entre les postes de travail (au niveau de l'atelier) et les établissements (au niveau de l'usine). L'étude des systèmes de transport automatisés s'est beaucoup développée avec l'apparition des Systèmes Flexibles de Production (SFP) [Blazewicz et al. 00], [Liu et Carthy 96].

Il existe une très grande variété des supports (Pont-roulants, convoyeur aériens, chariots, trains de chariots, convoyeurs au sol, ...). En réalité, la dynamique de fonctionnement de ces supports permet de caractériser deux familles de systèmes : les convoyeurs et les chariots.

- les convoyeurs sont des systèmes techniques qui équipent le chemin permettant d'aller de la source vers le puits. Ils sont de deux types : à accumulation et sans accumulation.
  - o Les convoyeurs sans accumulation ne font qu'introduire un retard entre l'entrée d'un produit à l'entrée du convoyeur et sa réception à la sortie.
  - o Les convoyeurs à accumulation permettent le blocage d'un produit. Ils peuvent être modélisés par une file d'attente de type FIFO.
- Les chariots ou transporteurs sont des moyens de transport d'un ou plusieurs produits (mécanique ou non) capable de suivre des trajectoires diverses. Ils sont plus flexibles que les convoyeurs. Ils regroupent des moyens aussi variés que des transpalettes, des camions, des AGV, ... ou un opérateur humain.

Dans le cadre de notre travail de recherche nous traitons les problèmes liés aux variables de support(s) de manière générale. Nous essayons dans un premier temps de traiter le premier type de famille, le cas le plus fréquent dans les systèmes manufacturiers. Une extension de ce travail sera envisagée pour intégrer le deuxième type de famille (chariots, AGVs) qui représente le moyen le plus flexible permettant de contrôler des variables de flux difficilement contrôlées avec la première famille.

La majorité des caractéristiques de supports est prédéfinie lors de la phase de conception du système manufacturier. La configuration est généralement faite pour englober la plupart des situations de fabrication possible. Cependant, certains paramètres doivent pouvoir évoluer afin de permettre des adaptations à des conditions spécifiques. Les paramètres de supports peuvent donc changer en fonction de :

- la politique de production adoptée ;
- le type de produit (option, quantité, délais, ...)
- la charge de travail sur certaines ressources (en amont, en aval)
- ...

Dans le cas d'une impossibilité de réglage de ces paramètres de supports, ils deviennent des contraintes à respecter lors de l'étude du flux de produits.

Nous représentons ici deux variables qui sont déterminantes pour le flux de produits puisqu'elles définissent des grandeurs fondamentales de flux.

### **Capacité du support**

Un support, quelque soit son type, possède une capacité définie en fonction de :

- la dimension du support (longueur, taille, ...)
- la dimension des produits à transporter
- ...

Cette capacité est un facteur important pour définir la capacité maximum du flux. Elle est définie par le nombre maximum de produits pouvant être simultanément transportés par le support(s).

### **Vitesse du support [unité de longueur/unité de temps]**

La vitesse de support représente la deuxième grandeur prédéfinie lors de la phase de conception, et qui permet de définir la vitesse maximum qu'un flux de produit peut avoir dans l'idéal.

En fonction du type du support, (tapis roulant, convoyeur, AGV, ...), la vitesse du support est définie comme la vitesse avec laquelle un produit ou un ensemble de produits peuvent circuler dans le système.

La vitesse des produits est forcément inférieure, ou égale, à celle du support. Les produits peuvent être retardés lors d'un transport pour différentes causes : accumulation, saturation, ...

## **5.3 Variables du flux**

Un flux peut généralement être représenté par trois variables principales : le débit  $q$ , la densité  $d$  et la vitesse  $v$ . Nous détaillons ci après la définition pour chacune des variables.

### **Vitesse du flux [Unité de longueur/unité de temps]**

Cette grandeur peut être mesurée de deux manières :

**Vitesse moyenne temporelle** ( $\bar{v}_t$ ) : la moyenne arithmétique des vitesses des produits entre deux points  $x$  et  $x+\Delta x$  à un instant donné  $t$ .

$$\bar{v}_t = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n v_i$$

$n$ : le nombre de produits dans l'espace  $\Delta x$  à l'instant  $t$

$v_i$  : la vitesse du produit  $i$  à l'instant  $t$

**Vitesse moyenne spatiale** ( $\bar{v}_s$ ) : différentes définitions sont proposées :

« La vitesse basée sur la moyenne des temps passés pour traverser la distance  $L$  »

« Le déplacement total divisé par le temps total de ce déplacement [ITE 76] »

$$\bar{v}_s = \frac{L}{\frac{1}{n} \sum_i t_i}$$

$L$  : la distance parcourue

Dans le cadre de notre travail sur le flux de produits dans le système manufacturier nous choisirons la vitesse moyenne spatiale pour deux raisons :

- elle est plus proche de la vitesse réelle du flux
- la mesure de la vitesse de chacun des produits dans le flux est une opération difficilement applicable qui coûte chère. Par contre, fixer la distance et mesurer le temps de parcours est beaucoup plus facile et faisable avec les moyens de mesure classiques.

### Débit $q$ [nombre d'objets/unité de temps]

C'est le nombre  $N$  d'objets qui passe en un point  $x$  entre les instants  $t$  et  $t+\Delta t$

$$q(x, t, t + \Delta t) = \frac{N(x, t, t + \Delta t)}{\Delta t}$$

La valeur du débit est calculée à un point précis (à la source, au puits, à un point entre la source et le puits) pendant une durée de temps déterminée  $\Delta t$ .

### Concentration $\rho$

La concentration est très souvent utilisée comme synonyme de la densité. Cette grandeur permet de comparer les deux grandeurs : densité et occupation que nous allons ensuite détailler.

Indépendamment de l'espace et du temps, la concentration représente le nombre d'objets dans un espace donnée  $\Delta x$  sur une durée de temps  $\Delta t$  par rapport au nombre maximum d'objet pouvant potentiellement se trouver dans ce même espace  $\Delta x$  (capacité maximum). Autrement dit elle représente le pourcentage de remplissage réel du support par rapport à sa capacité maximum.

$$\rho = \frac{N}{N_{\max}}$$

$N$  : nombre de produits réellement sur le support

$N_{\max}$  : nombre maximum de produits possible sur le support

Reprenons l'exemple suivant : un support de capacité de 10 produits maximum. Nous calculons la concentration dans le cas où il y a 4 produits sur le support. Comme le montre la (Figure 20) deux emplacements différents de produits donne la même valeur de concentration.

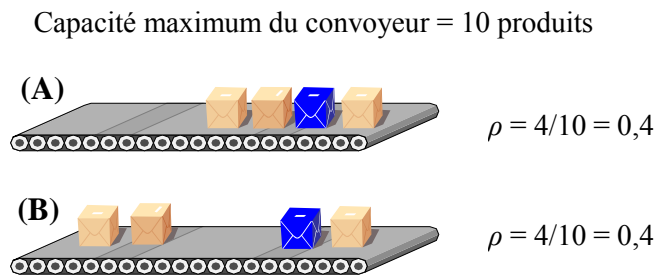


Figure 20. Exemple du calcul de la concentration

La mesure de la concentration sur un espace donnée définit la notion de densité.

### Densité $d$ [nombre d'objets/unité d'espace]

La densité est le nombre d'objets occupant un espace donné entre deux points  $x$  et  $x+\Delta x$  à l'instant  $t$

$$d(t, x, x + \Delta x) = \frac{N(x, x + \Delta x, t)}{x + \Delta x}$$

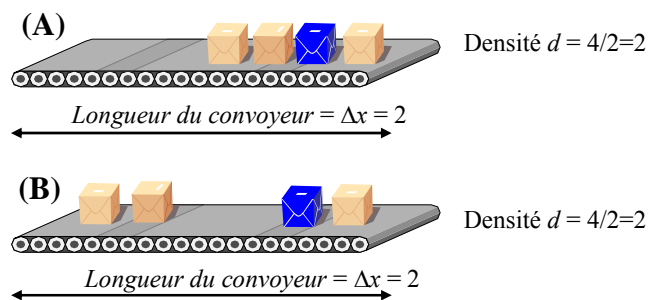


Figure 21. La même densité peut avoir deux positionnements différents d'objets sur le support

Les deux exemples (Figure 20) et (Figure 21) montrent bien que la mesure de la densité et de la concentration a donné la même valeur pour deux emplacements différents des produits sur le support. A cause de la **difficulté de mesurer** ces deux grandeurs à un instant donné et **l'imprécision de la présentation de positionnement d'objets dans le flux**, elles peuvent être remplacées par ne autre grandeur plus précise : l'occupation.

### Occupation $\tau$

C'est le pourcentage du temps d'occupation d'une zone de détection : La proportion du temps pendant laquelle un capteur détecte la présence de produits (objets) dans une zone de détection. Pour chaque produit, le temps d'occupation de la zone de détection est déterminé par la vitesse  $v$  du produit et la longueur  $L$  du produit lui même ainsi que de la longueur  $l$  de la zone de détection.

Pour un intervalle de temps  $(t+\Delta t)$ , l'occupation  $\tau$  est donnée par la formule :

$$\tau = \frac{\sum_i (L + l) / v_i}{t + \Delta t}$$

Cette grandeur permet non seulement d'évaluer le pourcentage de remplissage du convoyeur mais elle permet également de donner une idée sur le positionnement des produits sur le convoyeur.

Reprenons le même exemple (Figure 21) et en précisant quelques paramètres supplémentaires comme :

- la longueur de produit  $L = 0,2$  m ;
- la vitesse du convoyeur (des produits)  $v = 0,5$  m/min
- la longueur de la zone de détection  $l = 0,01$  m ;
- la capacité maximum du convoyeur est de 10 produits

Nous calculons l'occupation  $\tau$  pour un intervalle de temps de 4 min

L'occupation  $\tau$  est :

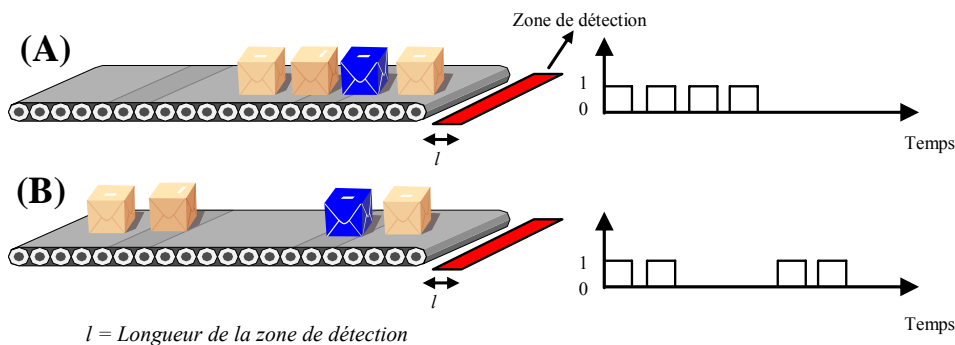
Dans le cas A et B (Figure 22) :

$$\tau = \frac{((4 * 0,2) + 0,01) / 0,5}{4} = 0,41 \quad \rightarrow \text{Le convoyeur est presque à moitié rempli}$$

Dans les cas où le convoyeur est rempli (capacité maximum) :

$$\tau = \frac{((10 * 0,2) + 0,01) / 0,5}{4} = 1,005 \quad \rightarrow \text{Le convoyeur est complètement rempli.}$$

Comme nous l'avons dit précédemment, l'observation de l'activation de la zone de détection peut permettre de savoir les positionnements des produits sur le convoyeur (Figure 22).



$l =$  Longueur de la zone de détection

**Figure 22. Exemple sur le calcul de l'occupation**

La mesure classique de la densité (nombre de produits par unité de longueur) ignore les effets de la longueur de produits et la composition de ces produits dans le flux : la densité ne représente donc pas cette forme de variété des produits dans le flux.

L'occupation est directement affectée par ces deux facteurs, elle donne ainsi un indicateur plus proche sur ce qui se passe réellement dans un flux (Figure 22).

Pour le même flux, la densité mesure la concentration sur l'espace et l'occupation mesure la concentration sur le temps. Autrement dit la densité représente la concentration spatiale et l'occupation représente la concentration temporelle du flux de produits.



La mesure de la densité est faite tout au long d'une longueur précise. Lorsqu'il y a un seul point de mesure la densité est donc mesurée soit par sa relation avec le débit et la vitesse (l'équation de débit massique), soit en mesurant l'occupation.

## **6 Niveaux d'observation et de représentation des flux**

### **6.1 Problématique**

L'écoulement d'un flux est le résultat d'un ensemble de comportements individuels en interaction. Chaque objet (produit, matière, liquide) dans le flux va interagir avec son environnement, c'est-à-dire les autres objets dans le flux et l'infrastructure (le support), dans lequel il est immergé. Cet écoulement peut être observé à deux niveaux différents, mettant en œuvre des phénomènes différents :

- un niveau microscopique, où sont représentés les comportements individuels des objets constituant le flux, les interactions entre eux et avec leur environnement,
- un niveau macroscopique, où sont représentés des comportements d'ensemble d'objets, les interactions entre ensembles et avec leur environnement.

Dans certaines sciences (mécanique des fluides, électricité, ...) l'étude des flux s'effectue principalement au niveau macroscopique à partir de lois et propriétés issues d'études sur le niveau microscopique. Ceci est à notre sens essentiellement lié à une certaine forme d'homogénéité de la matière concernée par les flux.

Les flux mis en œuvre dans les systèmes manufacturiers étant par nature hétérogène, le niveau d'étude des flux est fortement dépendant du cadre applicatif, des connaissances sur celui-ci et des objectifs de l'étude menée (recherche de tendances ou vision détaillée par exemple).

La frontière entre ces deux niveaux est, de plus, relativement diffuse : elle dépend de la nature, de la taille et de l'échelle de temps du système étudié. Par conséquent, pour représenter la dynamique de l'écoulement du flux, il semble important que les deux niveaux puissent être analysés et étudiés. Pour lier ces deux niveaux de représentation, des techniques dites d'agrégation ont été proposées. Le paragraphe suivant recense un certain nombre d'entre elles.

### **6.2 Techniques d'agrégation**

Au regard de la littérature, l'agrégation peut se définir comme « une forme d'abstraction par laquelle un ensemble d'entités différentes, mais entre lesquelles des liens peuvent être établis, sont regroupées et désignées par une même appellation agrégée » [Boskma 82], [Zolghadri 98], [Dupont 00], [Fontan et *al.* dans Burlat et Campagne 01].

Son but est de réduire la quantité de données du système étudié [Zolghadri et Bourrières 98]. En même temps qu'elle rend possible un raisonnement global [Bourrières 98] grâce à un modèle simplifié, l'agrégation implique aussi nécessairement une perte d'information [Aldanondo 92]. Il est en effet inhérent à toute agrégation que les caractéristiques des entités de départ ne sont plus identifiables dans l'entité agrégée obtenue.

Au sein d'un système de production, l'objectif recherché par la technique d'agrégation est de réduire le niveau de détail des informations que le système de décision utilise ou génère [Aldanondo 92]. Le système d'information sur lequel s'appuie le système de décision doit donc être adapté à chaque niveau de décision. Il est donc logique que de nombreux travaux liés à l'agrégation portent sur la structuration d'information nécessaire à la décision.

[Fontan et *al.* dans Burlat et Campagne 01] distingue deux types d'agrégation :

- *agrégation logique* : qui vise à regrouper des catégories d'objets ayant des caractéristiques communes et ne se différenciant que par un nombre réduit de particularités jugées secondaires (un objet agrégé correspond à un objet détaillé banalisé)
- *agrégation physique* : qui considère comme un tout indissociable un ensemble d'objets éventuellement hétérogènes.

L'agrégation peut porter sur plusieurs types de données :

- les produits ou les matières [Axsäter 81],
- les opérations ou tâches (ressources de production) [Axsäter 81],
- le temps [Boskma 82], [Hétreux et *al.* 96], [Özdamar et Yazgac 99], [Erschler et Grabot 01].

La combinaison de ces différents types d'agrégation peut permettre une modélisation plus ou moins fine de la réalité et donc d'obtenir indirectement un niveau de vision des flux plus ou moins détaillé.

Forrester, dans ses travaux initiaux, sur la dynamique des systèmes [Forrester 61], a énoncé un certain nombre de recommandations générales concernant l'agrégation des flux. Ces recommandations générales ne prennent cependant pas en compte les problèmes de nomenclature, d'assemblage, d'hétérogénéité de l'agrégation entre les flux de composés et de composants. Sur les bases proposées par Forrester, [Bruniaux 00] a déployé, une procédure d'agrégation des flux reposant sur un certain nombre de principes et de règles. Cette procédure prend notamment en compte les liens de la nomenclature, et regroupe des flux considérés comme suffisamment proche (suivant des caractéristiques dynamique notamment).

Dans le chapitre suivant, nous proposerons une méthode d'agrégation générale des flux de produits, prenant en compte l'hétérogénéité des produits, les opérations appliquées aux produits ainsi que les opérations appliquées au flux (convergence, divergence).

## 7 Modélisation-Simulation en vue d'une évaluation des flux

### 7.1 Modélisation des flux

L'étude des flux manufacturiers est classifiée selon, d'un coté, la nature du flux, les processus manufacturiers qui leurs sont appliqués, et le niveau de détail recherché. Dans ce contexte, trois types de modélisation sont distingués : modélisation *continue*, *discrète* et *hybride*.

Les modèles *continus* sont utilisés pour étudier les variables d'état qui changent de façon continue avec le temps. Des équations mathématiques et différentielles modélisent le comportement du système. Ces modèles permettent en général d'obtenir une vision de type macroscopique du système et de ses changements d'états dans le temps [Kumar et Kleine 83]. Par ailleurs, les modèles à *événements discrets* utilisent les variables d'état événementielles (variables qui changent à l'occurrence de certains événements liés au système). Ils représentent (ou permettent de représenter) un niveau de détails important des systèmes étudiés. Ils correspondent donc par nature à une vision de type microscopique du système. Il est cependant possible, sur la base de tels modèles, d'obtenir par des techniques d'agrégation l'état estimé de variables d'état du système de nature continue.

Un flux d'objets hétérogènes pouvant tout aussi bien être qualifié par des variables d'état continues que discrètes, le domaine d'étude et de modélisation correspond donc à notre sens au niveau mesoscopique défini par [Bourrel et Henn 02].

Ce niveau centré sur le flux, peut apparaître comme un niveau intermédiaire entre le niveau microscopique, centré sur les objets dans le flux, et le niveau macroscopique, centré sur une vision tendancielle du flux.

### 7.2 Méthodes de simulation de flux

Le Tableau 3 ci-dessous montre une comparaison entre les différentes méthodes de simulation de flux. La comparaison favorise l'approche orientée objets que nous adoptons dans notre modélisation du flux de produits, et cela grâce à sa capacité de faire à la fois l'évaluation et l'optimisation de performance de flux de différentes natures et aux différents niveaux de modélisation.

Méthode de Modélisation		RdPs <sup>8</sup>	Réseau de File d'attentes	Diagramme de Forester	Bond Graphs	Modélisation Orienté Objets
Critères						
<b>Nature de flux</b>		Flux d'information Flux physique	Flux d'information Flux physique		Flux physique	Flux d'information Flux physique
<b>Niveau</b>	<b>Microscopique</b>	X				X
	<b>Mésoscopique</b>					X
	<b>Macroscopique</b>	X	X	X	X [Tanguy 00]	X
<b>Nature de temps</b>	<b>Continu</b>	X [Amrah 98]		X [Bruniaux 00]	X	X
	<b>Discret</b>	X [David et al. 98]	X			X
	<b>Hybride</b>	X [Medjoudj et al. 04]				X
<b>Critiques</b>		Les notions d'interaction restent figées au sein d'un même niveau de décomposition	Ils sont adaptés pour la gestion de flux physique mais ils sont difficilement adaptables à la gestion de flux d'information	La vision de flux est macroscopique. Certains détails de flux d'objets hétérogènes sont forcément négligés.	Outil de conception [Tanguy 00] difficilement adapté pour le cas de flux discret [Lair 00]	Outil plus puissant et le plus utilisé pour modéliser le flux quelque soit sa nature et le niveau d'observation adopté

**Tableau 3. Comparaison de méthodes de modélisation et de simulation de flux**

<sup>8</sup> Par RdPs nous nous entendons tous les réseaux de pétri et ses extensions (colorés, temporisés, continus, hybrides, ...)

## 8 Conclusion

Le contrôle du flux manufacturier est basé principalement sur la connaissance que nous avons sur le flux. La définition du flux et l'identification de ses différentes variables et propriétés ainsi que des lois contrôlant son évolution est une étape indispensable à sa maîtrise et son contrôle.

L'étude présentée dans ce chapitre a permis de définir ces variables et lois. L'analyse bibliographique a montré l'existence de lacunes dans la littérature notamment pour l'étude et la modélisation de flux de produits hétérogènes.

L'étude de la problématique liée aux niveaux d'observation de flux a montré l'intérêt d'un niveau intermédiaire « mésoscopique ». Ce niveau permet en effet de passer du niveau microscopique au niveau macroscopique et vice versa, sans perte d'information caractérisant un flux d'objets hétérogènes. La définition de ce niveau exige une identification des variables et des propriétés caractérisant l'hétérogénéité du flux d'objets.

Enfin, l'étude de la méthode de modélisation et de la simulation des flux manufacturiers nous a permis d'établir un comparatif des différents modèles habituellement utilisées.

## **Chapitre III. Propositions de modèles de flux manufacturiers**



# 1 Introduction

Nous avons présenté dans le chapitre précédent les variables et les lois caractérisant le flux en général. L'objectif de ce chapitre est de proposer des qualifications complémentaires que nous estimons importantes, voire essentielles, pour un flux manufacturier, car à notre sens représentatives de son hétérogénéité. En nous appuyant sur la notion de rang, nous développons un indice de fluidité et la notion de motif d'un flux. Ensuite nous complétons cette qualification par une proposition du tétraèdre de Paynter pour le flux manufacturier.

Au final nous proposons :

- un modèle formel d'un flux d'objets hétérogènes sur la base des propositions faites dans ce chapitre et des variables recensées dans le chapitre précédent,
- les opérateurs modifiant les attributs de Temps, d'Espace et de Forme d'un flux soit par le biais d'une modification des attributs des objets du flux soit par le biais d'une modification des attributs du flux lui-même.

## 2 Modèles conceptuels d'un flux manufacturier

### 2.1 Qualifications complémentaires (rang, motif, indice de fluidité)

#### 2.1.1 Rang

La notion de Rang est ici introduite comme une propriété de l'objet dans un flux physique. Elle est proposée afin de rendre intemporelle la relation d'ordre existant entre les objets d'un flux (vision achronique).

Nous proposons ici d'associer à chaque objet dans un flux 2 types de rang particuliers:

- un rang de source ( $Rs$ ) auquel est affecté une valeur représentative de l'ordre d'entrée de l'objet dans le flux (ou sortie effective de la source). Cette propriété prend une valeur égale au nombre d'objets déjà entrés dans le flux plus un (sur la période donnée, une remise à zéro ayant lieu à chaque changement de période).
- un rang de puits ( $Rp$ ) auquel une valeur est affectée lorsqu'il sort du flux (entre dans le puits). Sa valeur est égale au nombre d'objets déjà sortis du flux plus un (là encore sur une période donnée, une réinitialisation étant faite à chaque changement de période).

Plus formellement, nous définissons donc :

- $Rs_{ij}$  : rang de source de l'objet  $i$  pour le flux  $j$
- $Rp_{ij}$  : rang de puits de l'objet  $i$  dans le flux  $j$

Ces rangs peuvent permettre une mesure non temporelle des avances-retards pris par les objets au sein d'un flux, comme cela est classiquement mis en œuvre dans l'industrie



automobile [Danjou 99], [Muhl 02]. Ils sont issus de l'observation (réelle ou simulée) d'objets en circulation dans un flux.

### 2.1.2 Indice de fluidité

Sur la base de ces deux types de rang, nous proposons pour notre part un indicateur de fluidité, basé sur les interactions des produits dans le flux.

En mécanique des fluides, fluidité et viscosité sont des notions intimement liées. La viscosité mesure la résistance d'un fluide à l'écoulement : elle désigne la capacité d'un fluide à s'écouler. C'est une caractéristique du fluide à s'opposer aux forces de dissociation et de mise en mouvement. Cette grandeur est fortement associée aux notions de pertes de charge et de dissipation de l'énergie. Elle est associée aux forces reliant les molécules des fluides créant une sorte de *relation de dépendance* entre elles.

La fluidité est perçue comme proportionnelle à l'inverse de la viscosité. Par exemple, l'huile a une viscosité plus élevée que l'eau, elle est donc moins fluide que l'eau.

A la différence de la mécanique des fluides, les objets manipulés dans les systèmes manufacturiers, ne peuvent être considérés comme identiques aux niveaux méso ou microscopiques.

[Baglin et al. 05] ont proposé un indice de fluidité du flux de produits comme le rapport entre le temps opératoire correspondant à la fabrication d'un produit et le cycle de fabrication de ce produit qui correspond au temps que met le flux pour s'écouler entre deux points du système logistique.

$$\text{Ratio de fluidité} = \text{Temps opératoire/délai d'écoulement}^9$$

La mesure est appliquée au flux agrégé<sup>10</sup> et elle ne permet pas d'estimer la fluidité d'un flux élémentaire (par exemple un flux de produits entre deux ressources).

Sur la base des deux types de rangs proposés précédemment, nous proposons l'indicateur de fluidité du flux  $j$  suivant :

$$If_j = \frac{\sum_{i=1}^n (Rs_i - Rp_i)^2}{m \cdot (m-1) \cdot (m+1)}$$

3

- $n$  représente dans cette formule le nombre de produits ou d'objets ayant traversé entièrement le flux. Autrement dit la valeur de cette indicateur de fluidité peut être calculée à chaque sortie d'un objet du flux (nature événementielle de la qualification).

<sup>9</sup> On parle également de cycle, temps de cycle ou temps d'écoulement

<sup>10</sup> La notion de flux agrégé sera présentée dans le paragraphe 4 (cf. § 4)

- le dénominateur de cette formule est introduit pour normaliser l'indicateur entre 0 et 1, il correspond à la valeur maximum que peut prendre le numérateur...  $m$  est défini comme la valeur maximum des  $R_{s_i}$  pour les  $n$  objets ayant traversé le flux.

Plus  $I_{f_j}$  est proche de 0, plus le flux sera considéré comme fluide. A l'inverse plus  $I_{f_j}$  est proche de 1, moins le flux est fluide.

Exemples simples de calcul :

$n$	$R_p$	$R_s$	$I_f$ (%)
1	1	2	-
2	2	1	100,00%
3	3	4	15,00%
4	4	3	20,00%
5	5	6	7,14%
6	6	5	8,57%
7	7	8	4,17%
8	8	7	4,76%
9	9	10	2,73%
10	10	9	3,03%
Flux Fluide			

$n$	$R_p$	$R_s$	$I_f$ (%)
1	1	9	-
2	2	2	26,67%
3	3	7	33,33%
4	4	3	33,75%
5	5	6	34,17%
6	6	5	34,58%
7	7	8	35,00%
8	8	4	41,67%
9	9	10	30,61%
10	10	1	55,15%
Flux moins fluide			

Tableau gauche : exemple d'évolution de  $I_f$  dans cas d'un flux « fluide »

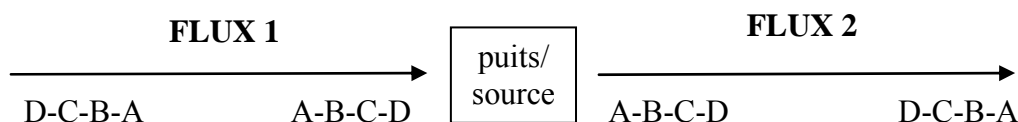
Tableau droit : exemple d'évolution de  $I_f$  dans le cas d'un flux « moins fluide »

**Tableau 4. Comparaison entre un cas d'un flux fluide et un cas d'un flux moins fluide**

L'avantage d'un tel indicateur, outre son aspect achronique, réside dans le fait qu'il permet de détecter progressivement les perturbations pouvant avoir lieu lors de la circulation de produits dans le flux. Ces perturbations ne peuvent être en l'état mesurées et quantifiées qu'aux points de sortie des objets du flux (le puits). Une mesure de celles-ci dans le flux lui-même serait un avantage indéniable, mais n'est à l'heure actuelle pas technologiquement possible (ou à des coûts trop importants), car elle nécessite d'avoir un accès permanent à celle-ci.

### Indice de fluidité pour flux séries

Considérons l'exemple très simple représenté par la Figure 23.



**Figure 23. Exemple indice de fluidité pour flux séries**

Deux flux (flux 1 et 2) sont liés par un puits-source. Les séries de lettres en début et en fin de flèches représentent (en relatif) l'ordre de passage des produits respectivement en entrée et en sortie des deux flux.

Sur cet exemple (lorsque les 4 objets sont sortis) :

$$If_1 = 1$$

$$If_2 = 1$$

Ces deux flux élémentaires sont donc très peu fluides...

La question se pose alors de l'agrégation de ces deux flux :

- La première option consiste à ne pas considérer le flux agrégé qu'au travers d'une vue externe (sa source est celle du flux 1, son puits est celui du flux 2) avec l'inconvénient de « perdre » l'information sur la fluidité dans le flux à laquelle on a pourtant accès... En effet sur l'exemple précédent cet indicateur vaudrait 0 (flux parfaitement fluide, il semble ne pas y avoir de modifications de rang), alors qu'il est composé de 2 flux très « visqueux » !
- La seconde option consiste pour sa part à prendre en compte les informations disponibles au niveau des flux élémentaires (vision interne) et à calculer l'indicateur de fluidité agrégé sur la base des indicateurs de fluidité des 2 flux élémentaires sur l'exemple précédent  $If_{1,2} = 1$  (flux non fluide). Cette valeur semble plus cohérente que celle obtenue avec la première option, c'est pourquoi l'indicateur que nous proposons est lié à la seconde option.

Plus formellement nous définissons : 
$$If_{1,2} = \frac{m_1 \cdot If_1 + m_2 \cdot If_2}{m_1 + m_2}$$

avec  $m_1$  et  $m_2$  représentant respectivement les valeurs maximales des rangs de sources pour les objets ayant traversés les flux 1 et 2

La généralisation à plus de 2 flux en série est immédiate.

### Indice de fluidité pour flux parallèles

Le raisonnement mené pour le calcul d'un indicateur de fluidité pour des flux parallèles est identique à celui mené sur les flux séries. Cependant, si dans le cas de flux en série, le même nombre d'objets passe sur l'ensemble des flux, ceci n'est plus vrai dans le cas de flux en parallèle.

C'est pourquoi nous proposons l'indicateur agrégé suivant pour le cas de flux en parallèle :

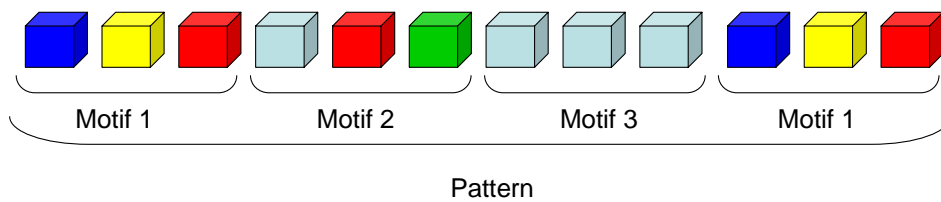
$$If_{1//2} = \frac{n_1 \cdot If_1 + n_2 \cdot If_2}{n_1 + n_2}$$

où  $n_1$  et  $n_2$  représentent le nombre d'objets ayant traversé le flux au moment du calcul.

### 2.1.3 Motif

Afin de tenter de caractériser l'hétérogénéité de flux d'objets discrets, nous introduisons dans ce paragraphe la notion de motif. Cette notion est introduite pour représenter l'évolution de la forme du flux hétérogène au travers le temps (vision diachronique). Elle complète à notre sens la notion de Rang introduite précédemment à un niveau plus macroscopique.

Le terme motif est évoqué dans la littérature anglo-saxonne sous les termes "pattern" ou "motif". En biologie, un motif et un pattern sont distingués. Un "motif" est généralement un segment court, continu et non ambigu d'une séquence d'objets alors qu'un "pattern" a une structure plus complexe. Il est souvent composé de différents "motifs" qui peuvent être plus ou moins éloignés les uns des autres et sa définition peut comporter des exclusions ou des associations de "motifs". C'est pourquoi, il est parfois nécessaire d'utiliser implicitement des opérateurs logiques tels que OU, ET ou NON dans sa définition<sup>11</sup>. On peut considérer très souvent qu'un "motif" est une séquence exacte ou peu dégénérée et qu'un "pattern" est une séquence dégénérée et/ou composée (Figure 24). On utilisera le terme générique de motif pour désigner l'ensemble de ces deux types de séquences.



**Figure 24. Différence entre Motif et Pattern**

### ***Définition du motif dans un flux de produits***

Un motif d'un flux de produits est défini comme l'organisation d'un ensemble de produits dans le flux selon une relation d'ordre. Le séquençement, défini par cette relation d'ordre, exprime le successeur et le prédécesseur pour chaque produit existant dans le motif.

Le motif peut être construit à partir du croisement de la notion du rang avec une ou plusieurs propriétés des objets dans un flux.

### **Intérêts des « motifs »**

Le motif est à notre sens un attribut de forme du flux. Il ajoute une dimension qualitative à des variables d'états quantitatives (débit, vitesse, etc...)

Les motifs peuvent être mis en œuvre par le biais de règles de gestion déployées dans une source (à la naissance d'un flux) ou lors de convergence ou divergence de plusieurs flux. On peut imaginer que le contrôle d'un flux ait pour vocation à établir un motif particulier (ce qui d'ailleurs le cas pour les ordonnancements cycliques) répondant à des objectifs précis.

### **Propriété du motif dans un flux de produits**

Un motif est caractérisé par les propriétés suivantes :

- **Le longueur du motif** : chaque motif possède une longueur définie par le nombre de produits le composant et qui occupent une partie du longueur totale du flux

<sup>11</sup> [http://www.univ-tours.fr/genet/gen001400\\_fichiers/documents/GENETBIOINFCOMPLET.DOC](http://www.univ-tours.fr/genet/gen001400_fichiers/documents/GENETBIOINFCOMPLET.DOC)  
<http://www.dsi.univ-paris5.fr/bio2/biocours/cha2-3.html>

- **Nombre de type de produits**
- **Séquence des produits** : c'est l'ordre selon lequel les produits se positionnent pour former le motif.

Dans un flux composé d'un ou plusieurs motifs nous proposons d'observer les variables suivantes :

### **Débit du motif**

Nous définissons le débit du motif comme le nombre de motifs qui passent à un point de mesure par unité de temps. La connaissance de cette variable permet donc implicitement de connaître le nombre total de produits ainsi que le nombre de produit de chaque type ayant passé un point de mesure sur une période donnée.

### **Densité du motif :**

La densité du motif représente le nombre de motifs existant par unité de longueur. La mesure de la densité de cette manière permet de connaître, contrairement à la mesure de densité de produits tout simplement, le séquençement des produits dans l'espace de mesure définie.

## **2.2 Adaptation du Tétraèdre de Paynter au flux manufacturier**

L'approche proposée ici vise à adapter le modèle général de [Paynter 61] au cas particulier des flux discrets. Cette approche par analogie aboutit à une proposition de variables généralisées propres aux flux discrets, ainsi qu'à la proposition de relations entre elles. Ces dernières peuvent être utilisées pour la construction de nouveaux indicateurs de flux discrets. Ces indicateurs de flux complètent les mesures classiques utilisées en production qui concernent soit une vision d'ensemble du système (macroscopique) [Payne 71], [Kerner et Konhäuser 94], [Helbing 98] soit une vision détaillée de celui-ci (microscopique) [Gazis et al. 61], [May et Keller 67], [Bando et al. 95]. Le flux peut être perçu comme un niveau intermédiaire (mésoscopique) [Fontana75], [Helbing 96] qui peut être contrôlé par le biais des indicateurs ainsi obtenus.

Comme nous l'avons déjà vu au chapitre précédent, les quatre variables généralisées sont fortement liées (couplées). Autrement dit une variable généralisée du tétraèdre correspond toujours à une variable conjuguée. Un *effort* correspond toujours à un *flow* et réciproquement. Il n'y a pas dans la nature de tension électrique sans courant (même nul), de débit sans pression, de température sans entropie ....

Exemples de la traduction de ces associations : à un volume de fluide on associe sa pression, à une quantité de mouvement on associe une vitesse. Les variables généralisées se retrouvent associées par paires dans la nature. Une des propriétés de ces couples est qu'ils sont constitués d'une variable intensive *In* et d'une variable extensive *Ex* (voir le chapitre II).

Nous proposons dans cette partie une définition du tétraèdre de Paynter du flux manufacturier en définissant les quatre variables généralisées du tétraèdre et les relations entre elles. Ces relations servent dans la suite pour définir quelques indicateurs de flux physiques [Alkassem et Charpentier 04].

### 2.2.1 Proposition d'une définition des variables généralisée

La démarche proposée pour formuler notre proposition se résume en trois étapes essentielles (Figure 25).

- étape 1 : consiste à faire l'analogie avec la mécanique des fluides et la théorie du trafic pour développer et étudier le comportement du flux manufacturier. Cette étape se termine par une définition de deux variables généralisées du flux manufacturier : *flow*, *effort*.
- étape 2 : en s'appuyant sur le tétraèdre de Paynter les variables généralisées (*displacement*, *impulse*) sont développées à la fin de cette étape.
- étape 3 : consiste à définir les relations généralisées reliant ces quatre variables. Nous définissons pour le flux manufacturier les relations : F1 la capacitance, F2 la résistance et F3 l'inductance généralisée.

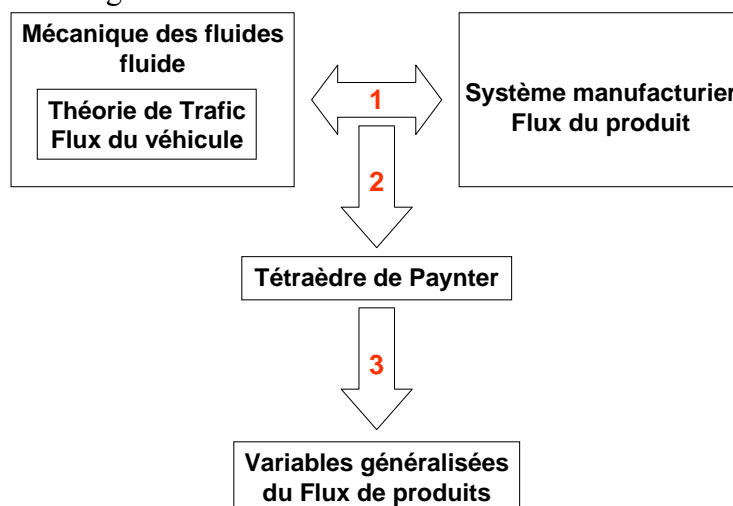


Figure 25. Étapes du travail

Tout comme cela a été fait pour la théorie du trafic, nous nous baserons sur des analogies entre mécanique des fluides et flux manufacturier, mais également sur des analogies directes entre la théorie de trafic et le flux manufacturier.

Ce choix est argumenté par le fait que le flux manufacturier possède, selon le niveau d'observation, des natures continues et discrètes qui sont bien présentées et étudiées en mécanique des fluides et dans la théorie du trafic.

Dans un système fluide, la variable généralisée "*flow*" est symbolisée par le débit du flux. Cette variable doit être accompagnée par la variable généralisée "*effort*". Cette dernière représente l'effet de ce débit et représente en mécanique des fluides et dans le trafic la pression du flux. Dans la théorie du trafic, la pression est un élément utilisé pour étudier le

comportement du flux de véhicules mais aussi pour déterminer le facteur énergétique du flux [Jordanova et al. 04], [Jordanova et al. 06]. La nature de cette pression est dynamique, car les objets du flux sont en mouvement, nous négligeons dans ce cas la pression statique. La pression est proportionnelle à la densité du fluide et au carré de la vitesse (relation de Bernoulli et loi de Newton).

$$P = \frac{1}{2} \rho \cdot v^2$$

L'unité de mesure est  $\left[ \frac{\text{produit}}{m} \cdot \frac{m^2}{\text{sec}^2} \right] = \left[ \frac{\text{produit} \cdot m}{\text{sec}^2} \right]$

En s'appuyant sur la définition de la relation structurelle (voir chapitre II) entre l'effort et l'impulse définie par Paynter (Figure 26) on définit l'unité de mesure de la variable généralisée impulse.

$$\frac{d}{dt} p = e \Rightarrow p = \int e \Rightarrow \text{L'unité de mesure de l'impulse généralisée est } \left[ \frac{\text{produit} \cdot m}{\text{sec}} \right]$$

En s'appuyant aussi sur la définition de la relation structurelle entre le déplacement et le flow définie par Paynter on définit l'unité de mesure de la variable généralisée déplacement

$$\frac{d}{dt} q = f \Rightarrow q = \int f \Rightarrow \text{L'unité de mesure de déplacement est } [\text{produit}]$$

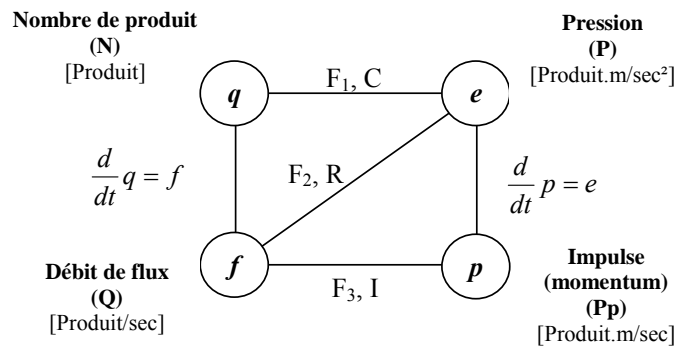


Figure 26. Adaptation du tétraèdre de Paynter au cas de flux de produits [Alkassem et Charpentier 04]

### 2.2.2 Proposition des relations entre les variables généralisées

Après la définition des variables généralisées et de leurs unités de mesure, l'étape suivante consiste à définir les relations entre ces variables, e.g. définir la capacitance, résistance et l'inductance. Là encore nous nous appuyons sur la théorie du trafic pour définir ces éléments.

### 2.2.2.1 Capacitance généralisée (Capacitance du flux)

Cette capacitance est reliée à la compressibilité limitée des flux. Cette compressibilité apparaît dans l'opération de stockage des produits. Elle est liée à la différence entre la quantité de produits entrante et sortante du volume contrôlé. Cette relation représente le lien existant entre les variables de l'effort et du déplacement.

La capacitance de fluide est définie comme le ratio du nombre de produits que le flux peut contenir (différence entre le nombre max de produits et le nombre de produits existant réellement dans le flux) sur la variable de pression. Elle représente la capacité du système à absorber des produits supplémentaires dans le flux.

En hydraulique, et en remplaçant les variables généralisées correspondant, cette relation donne  $[\text{kg/m}^4]$  comme unité de mesure :

$$F_1 = C = \frac{q}{e} = \frac{V}{P_{rv}} \text{ qui donne comme unité de mesure } \left[ \frac{m^3}{N/m^2} \right] \Rightarrow \left[ \frac{m^5}{N} \right]$$

Dans le trafic la notion de capacitance est développée de la même manière.

$$C = \frac{q}{e} = \frac{\text{Nombre de Véhicule}}{\text{pression}} \text{ qui a comme unité de mesure } \frac{[\text{véhicule}]}{[\text{véhicule.m / sec}^2]} = \left[ \frac{\text{sec}^2}{m} \right]$$

En suivant la même analogie que précédemment nous obtenons l'unité de mesure de capacitance pour un flux manufacturier exprimée, comme dans le trafic, en  $\left[ \frac{\text{sec}^2}{m} \right]$ , soit l'inverse de l'accélération.

$$C = \frac{\text{déplacement}}{\text{effort}} = \frac{q}{e}$$

$$C = \frac{(N_{\max} - N)}{P} = \frac{[\text{produit}]}{[\text{produit.m / sec}^2]} = \left[ \frac{\text{sec}^2}{m} \right] \Rightarrow C \sim \frac{1}{\text{Accélération}} \quad (2)$$

Où  $N_{\max}$  : le nombre maximum de produits pouvant existé dans le flux

$N$  : le nombre réel de produits dans le flux



### 2.2.2.2 Résistance généralisée (Résistance du flux)

Dans la théorie de fluide, la résistance du fluide « résistance hydraulique » est reliée avec les effets visqueux du fluide. Le développement de cette grandeur à partir du tétraèdre de Paynter donne la même unité de mesure

$$R = \frac{\text{effort}}{\text{flow}} = \frac{e}{f}$$

$$R = \frac{P}{q_v} = \frac{\text{pression}}{\text{débit volumique du flux}} = \frac{[N/m^2]}{[m^3/sec]} = \left[ \frac{N \cdot sec}{m^5} \right] = \left[ \frac{kg \cdot m \cdot sec}{sec^2 \cdot m^5} \right] = \left[ \frac{kg}{m \cdot sec^2} \cdot \frac{sec}{m^3} \right]$$

$$\rightarrow R = \frac{e}{f} = \frac{P}{q_v} = \left[ \text{Pascal} \cdot \frac{sec}{m^3} \right]$$

Dans le trafic la notion de résistance est développée de la même manière.

$$R = \frac{e}{f} = \frac{P}{q} = \frac{\text{pression du flux}}{\text{débit du flux}} = \frac{[\text{véhicule} \cdot m / sec^2]}{[\text{véhicule} / sec]} = \left[ \frac{m}{sec} \right]$$

D'un coté, cette résistance est proportionnelle à la densité et à la viscosité du trafic.

Plus la densité de véhicules augmente plus l'interaction entre les véhicules augmente. Cela augmente à son tour la résistance du trafic et aboutit pour certains cas aux phénomènes d'embouteillage. Dans ce cas, l'unité de mesure de la viscosité est la suivante :

$$R \sim \eta, \rho \rightarrow \eta \sim \frac{R}{\rho} = \left[ \frac{m / sec}{\text{véhicule} / m} \right] = \left[ \frac{m^2}{\text{véhicule} \cdot sec} \right]$$

D'un autre coté, la viscosité est exprimée dans la dynamique de vitesse du trafic comme la tendance de conducteur à résister au changement de la vitesse [Zhang 03]. Ce qui donne la même unité de mesure de la viscosité.

$$\eta \sim \frac{V}{\rho} = \left[ \frac{m / sec}{\text{véhicule} / m} \right] = \left[ \frac{m^2}{\text{véhicule} \cdot sec} \right]$$

En suivant la même analogie adoptée précédemment nous obtenons l'unité de mesure de résistance dans le cas de flux manufacturier.

$$R = \frac{e}{f} = \frac{P}{q} = \frac{\text{pression du flux}}{\text{débit du flux}} = \frac{[\text{produit} \cdot m / sec^2]}{[\text{produit} / sec]} = \left[ \frac{m}{sec} \right] \quad (3)$$

### 2.2.2.3 Inductance généralisée (inductance du flux)

L'inductance correspond selon le tétraèdre de Paynter à la relation existante entre les deux variables généralisées (*flow, impulse*).

$$F_3 = I = \frac{\text{impulse}}{\text{flow}} = \frac{p}{f}$$

En hydraulique et en remplaçant les variables généralisées correspondantes, cette relation donne  $[\text{kg}/\text{m}^4]$  comme unité de mesure.

$$F_3 = I = \frac{p}{f} = \frac{Pp}{Q_v} \left[ \frac{\text{N} \cdot \text{sec} / \text{m}^2}{\text{m}^3 / \text{sec}} \right] \Rightarrow \left[ \frac{\text{N} \cdot \text{sec}^2}{\text{m}^5} \right] \Rightarrow \left[ \frac{\text{kg}}{\text{m}^4} \right]$$

Pour les fluides, l'inductance représente l'inertie des fluides, parce qu'elle est associée avec leurs effets inertiels. Elle représente le ratio de la baisse de pression sur le changement de débit massique de flux. Elle est représentée par :

$$I = \frac{\rho \cdot l}{A} = \frac{\text{masse volumique} \times \text{longueur}}{\text{Section}} \left[ \frac{\text{kg}}{\text{m}^4} \right] \quad (4)$$

Ce qui correspond à la même unité de mesure développée selon le tétraèdre.

Pour le cas du trafic la notion de l'inductance est développée de la même manière.

$$F_3 = I = \frac{p}{f} = \frac{P}{Q} \text{ qui a comme unité de mesure } \left[ \frac{\text{Véhicule} \cdot \text{m} / \text{sec}}{\text{Véhicule} / \text{sec}} \right] \Rightarrow [m]$$

De la même manière nous proposons l'inductance pour le cas d'un flux manufacturier en remplaçant les variables généralisée (*flow, impulse*). L'inductance sera exprimée par l'unité de mesure suivante :

$$F_3 = I = \frac{p}{f} = \frac{p}{Q} \left[ \frac{\text{produit} \cdot \text{m} / \text{sec}}{\text{produit} / \text{sec}} \right] \Rightarrow [m]$$

### 2.2.3 Synthèse

L'analogie entre le flux manufacturier et le trafic nous a permis de développer les variables généralisées de Paynter et leurs relations caractérisant le flux manufacturier. Les notions de capacitance, résistance et inductance peuvent être considérées comme des indicateurs potentiels permettant de comparer le comportement du flux dans différents conditions de circulation. Dans le trafic routier, la définition et l'importance de ces variables commencent à

apparaître comme une partie importante de la modélisation macroscopique volumique de flux de trafic [Jordanova et al. 04], [Jordanova et al. 06].

Après la définition de ces variables, l'étape prochaine est de les employer pour modéliser les flux physiques dans les systèmes manufacturiers. Ces variables représentent les paramètres permettant de contrôler les changements de flux et d'en évaluer son état futur.

### **2.3 Modèle formel d'un flux manufacturier**

A partir des éléments définis dans les chapitres précédents, nous proposons de récapituler l'ensemble des variables du flux caractérisant son aspect physique<sup>12</sup> dans un modèle binaire construit avec le formalisme NIAM<sup>13</sup> Figure 27. Pour faciliter sa lecture, l'Annexe 1 rappelle successivement les définitions des concepts NIAM. La verbalisation de ce modèle (voir Annexe 2) nous a permis de vérifier les concepts modélisés.

Au cours de cette étude, nous devons prendre en compte les hypothèses suivantes :

- Le modèle de flux que nous souhaitons avoir étant clairement *Mesoscopique* (entre le Micro et Macroscopique), nous ne cherchons pas à entrer dans un détail qui ne serait pas pertinent par rapport à l'objectif des études envisagées à partir de ce modèle. Nous ne cherchons pas non plus à négliger certains détails définissant des propriétés importantes (quantitatives ou/et qualitatives) en restant à un niveau d'abstraction élevé.
- La diversité des systèmes manufacturiers et même des flux de produits étant importante, nous cherchons à définir des concepts suffisamment génériques pour qu'ils puissent s'adapter à n'importe quel flux physique
- L'objectif est à terme de construire un *modèle de flux* permettant de décrire son comportement et de suivre l'évolution de ses variables. La possibilité de contrôler certaines variables est envisagée afin d'observer et d'étudier les effets sur le comportement du flux et donc du système global.

---

<sup>12</sup> L'intégration des variables caractérisant l'aspect énergétique du flux est envisagée dans les perspectives du travail de thèse.

<sup>13</sup> NIAM : Natural language Information Analysis Method, <http://www.orm.net/>

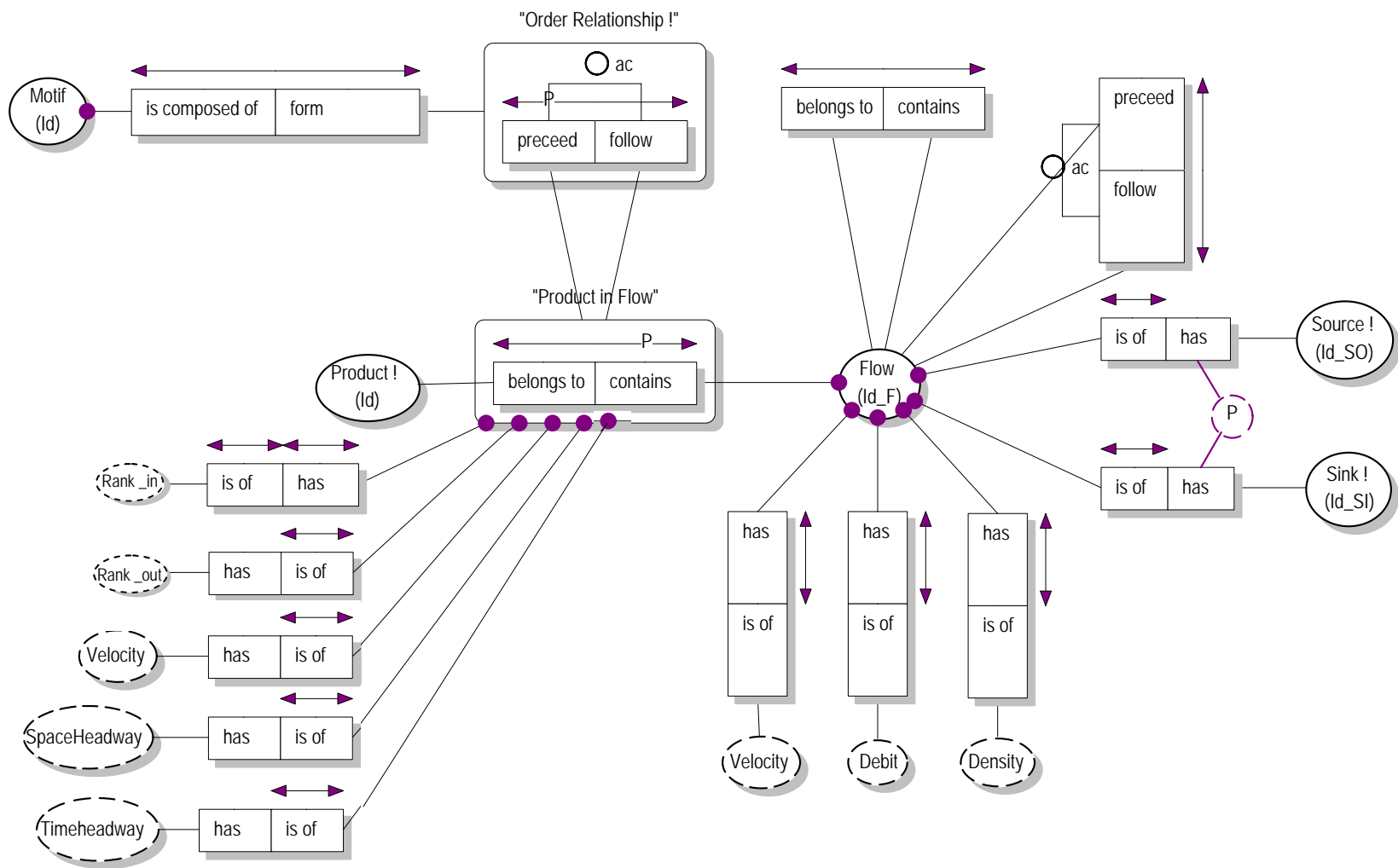


Figure 27. Modèle formel du flux manufacturier

Dans les perspectives de ce travail ce modèle du flux nous servira pour la construction des blocs d'une bibliothèque dédiée à la simulation de flux que nous proposons avec ARENA (cf. Annexe 5).

### 3 Macro-modèle de simulation de flux manufacturiers

#### 3.1 Introduction

Comme nous l'avons noté au chapitre 2, le flux peut être soumis à trois types d'opérateurs systémiques : stockage, déplacement, et transformation. Les opérations effectuées par ces opérateurs peuvent être appliquées à deux niveaux (Tableau 5) :

- Au niveau des objets du flux
- Au niveau du flux lui-même

L'opération appliquée par un des opérateurs porte des modifications d'au moins une des variables d'état du flux, et cela quelque soit le niveau d'application : objets du flux ou flux lui-même. L'ensemble des opérations définies ci-dessous génère des transformations qualitatives et/ou quantitatives du flux.

Opérateurs systémiques	Application aux objets du flux	Application au flux
<b>Stocker</b>	Stocker Objet	Transformer flux
<b>Déplacer</b>	Déplacer objet(s)	Dériver flux
<b>Transformer</b>	Modifier la forme de l'objet	Transformer flux
	Assembler des objets	Convergence de flux
	Désassembler des objets	Divergence de flux

Tableau 5. Tableau des opérateurs systémiques appliqués aux objets du flux et au flux lui-même

#### 3.1.1 Opérateurs au niveau des objets du flux

Il s'agit d'opérations appliquées au niveau microscopique du flux. Ces opérations sont appliquées directement aux objets du flux. Le type d'opération appliquée correspond au type d'opérateur chargé d'effectuer cette opération. Nous y distinguons donc :

- **Opération de stockage - déstockage d'objets** : cette opération permet d'effectuer un regroupement d'objets du flux. Ce type d'opération est souvent accompagné par un retardement d'objets ce qui provoque un retardement au niveau du flux. Elle est essentielle voire primordiale afin de :
  - 1.1.assurer le bon déroulement d'une opération en s'assurant d'avoir la bonne quantité de bons objets au bon endroit, ex. devant une opération de transformation, assemblage, désassemblage, ...
  - 1.2.équilibrer les charges en s'assurant une forme de continuité du flux pour éviter des phénomènes indésirables tels que saturation, famine, ...

- **Opération de déplacement d'objets** : il s'agit d'une opération de déplacement d'objet d'un point A à une autre point B.
- **Opération de transformation d'objets** : ce type d'opération permet d'effectuer des transformations morphologiques d'objets du flux. Selon leurs effets sur le flux nous distinguons trois types d'opérations de transformation :
  - 1.3. **Transformation d'objet** : c'est l'opération permettant d'effectuer une transformation simple d'objet. Du point de vue quantitatif, la quantité d'objets entrante est égale à la quantité sortante. L'impact de cette opération sur le flux est plutôt quantitatif.
  - 1.4. **Assemblage des objets** : C'est l'assemblage d'un ensemble de  $n$  composants (au moins deux) constituant un objet final. La transformation apportée par cette opération impacte le flux quantitativement et qualitativement. La quantité d'objets du flux sortant de cette opération est inférieure à celle entrant. La loi de conservation de la matière n'est pas valable, la réalisation de l'opération d'assemblage réduit le nombre d'objets sortant de cette opération en fonction de la nomenclature d'assemblage définie pour l'objet assemblé.
  - 1.5. **Désassemblage des objets** : c'est le désassemblage d'un objet en un ensemble de  $n$  objets « composants ». Comme dans l'opération d'assemblage, le désassemblage impacte le flux quantitativement et qualitativement. La quantité d'objets du flux sortant de cette opération est supérieure à celle entrante. Comme dans l'opération d'assemblage, la loi de conservation de la matière n'est pas valable non plus pour l'opération de désassemblage, la réalisation de désassemblage augmente le nombre d'objets sortant de cette opération en fonction de la nomenclature de désassemblage.

Remarque :

Une opération de stockage – déstockage peut être décomposée en deux opérations fictives et provisoires d'assemblage et désassemblage consécutivement, sous contraintes de l'égalité de nombres d'objets assemblés puis désassemblés.

### 3.1.2 Opérateurs au niveau du flux

Il s'agit d'opérations appliquées au niveau macroscopique du flux. Ces opérations sont appliquées directement au flux. Le type d'opération appliquée correspond, comme celle du niveau objets, au type d'opérateur chargé d'effectuer cette opération. Nous y distinguons :

- **Opération de stockage - déstockage de flux** : ce type d'opération est supporté par l'opération de stockage – déstockage effectuée au niveau d'objet. Il se manifeste sous forme d'un retardement ou ralentissement de flux, il permet également d'effectuer des changements dans la structure interne du flux. Les changements effectués par cet opérateur ne sont pas seulement quantitatifs comme dans le cas d'un flux homogène, ils sont également qualitatifs. Cette opération est parfois essentielle voire primordiale pour équilibrer les charges des flux et éviter des phénomènes indésirables comme par exemple la saturation « surcharges », la famine « manque d'objets », ... D'un point de vue du flux elle a donc comme effet (et souvent comme vocation) à en modifier la forme, c'est pourquoi cette opération peut être qualifiée d'opération de transformation du flux

- **Opération de déplacement de flux (dérivation)** : ce type d'opération consiste à faire dériver le(s) flux afin de changer sa source, son puits ou changer à la fois sa source et son puits.
- **Opérations de transformation du flux** : ceux sont des opérations appliquées indépendamment des opérations réalisées sur les objets du flux. Ce type d'opération porte sur des transformations morphologiques du flux. Nous distinguons ici :
  - 1.6. **Assemblage des flux « convergence de flux »** : C'est l'assemblage d'un ensemble des flux (au moins deux) :  $n$  objets du flux F1 et  $m$  objets du flux F2 pour constituer le flux final ( $n+m$  objets) sortant de cette opération. Il s'agit d'une opération permettant d'effectuer des changements qualitatifs et quantitatifs du flux tout en respectant la loi de conservation de matière (à l'inverse de l'assemblage d'objet). Le nombre d'objets de l'ensemble des flux entrant est égal à celui du flux sortant.
  - 1.7. **Désassemblage des flux « divergence de flux »** : c'est le désassemblage d'un flux composé de  $n+m$  objets en un ensemble de flux (au moins deux) : flux F1 de  $n$  objets et flux F2 de  $m$  objets. La divergence permet de changer le flux quantitativement et qualitativement tout en respectant également la loi de conservation de matière. La quantité d'objets du flux entrant est égale à la somme des quantités des flux sortant.

Remarques :

L'opération de déplacement de flux peut apparaître comme une activité « décisionnelle ». Si on ne prend en compte que la partie physique du flux cette opération peut être vue comme une succession d'opérations de convergence et de divergence.

Les opérations d'assemblage et de désassemblage des flux ne changent pas les caractéristiques physiques d'objets du flux. Contrairement aux opérations d'assemblage et/ou désassemblage des objets, les objets entrants et sortants des opérations de convergence et/ou divergence sont les mêmes. D'un point de vue quantitatif, le flux est soumis à la loi de conservation de la matière.

Les opérations présentées précédemment sont les opérations les plus élémentaires. Sur la base de ces opérations d'autres opérations peuvent être composées.

### **3.2 Synthèse des opérateurs**

Les opérations définies précédemment sont les opérations de base permettant de réaliser une (des) opération(s) sur le flux au niveau micro et/ou macroscopique. Nous définirons ci-dessous une synthèse de ces opérateurs appliqués au niveau d'objet du flux, puis au niveau du flux lui-même. Pour chacun des opérateurs proposés, nous définirons les paramètres et les variables caractérisant les objets du flux et le flux lui-même. Les variables identifiées font référence aux variables définies au chapitre II.

Afin de faciliter la présentation des opérateurs nous proposons des présentations graphiques qui seront utilisées plus tard pour schématiser le flux physique et le modéliser. Dans la présentation de chaque opérateur nous utiliserons des carrés noirs pour symboliser les ports utilisables pour créer les liens logiques entre les opérateurs.

### 3.2.1 Les opérateurs simples des objets du flux

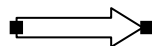
C'est l'ensemble des opérateurs permettant d'effectuer des opérations aux objets du flux. Les opérations réalisées par ces opérateurs visent spécialement les objets du flux en modifiant leurs caractéristiques (type, dimension, ...).

Les effets de ces opérations impactent non seulement sur les objets mais aussi sur le flux même.

Un opérateur est caractérisé par un ensemble de paramètres comme par exemple : la durée de l'opération, la capacité, ... Ces paramètres varient en fonction du type et du niveau de technologie utilisée.

#### *Circulation simple*

La circulation simple est l'opérateur qui représente le mouvement des objets dans le flux. Dans un système de production, une circulation peut être supportée par un convoyeur, un chariot, un tapis roulant, ... Elle est essentielle afin de relier physiquement une source ou une opération à une autre opération ou à un puits. Elle est obligatoirement précédée par une source ou un opérateur effectuant une opération au niveau de l'objet ou du flux. Elle est suivie par un puits ou un opérateur effectuant une opération au niveau de l'objet ou du flux. Nous représentons la circulation simple par une flèche avec deux ports (Figure 28). Le sens de la flèche correspond au sens de l'écoulement des objets dans le flux.



**Figure 28. Représentation graphique de la circulation simple**

Dans une circulation simple, nous supposons que l'écoulement des objets est soumis à la règle FIFO (First In First Out). La circulation simple n'a pas d'impact sur les rangs d'objets et donc n'a pas non plus d'impact sur le motif.

Dans le cas où les objets sont soumis à des changements de rang pendant leur écoulement dans une circulation, un autre opérateur dit de « circulation composite » sera proposé.

#### Paramètres et variables au niveau d'objet du flux

Les paramètres caractérisant un objet dans une circulation simple sont son type et ses caractéristiques morpho dimensionnelles. Nous pouvons observer les variables d'objet suivantes :

- la vitesse d'objet



- la position, l'orientation
- l'espacement amont et aval
- le rang

Paramètre et variables au niveau du flux même

Le paramètre identifié pour un flux dans une circulation simple est le motif. Des variables du flux peuvent être observées comme par exemple :

- la vitesse moyenne
- le débit d'entrée
- le débit de sortie
- la densité

### ***Transformer objet***

Cet opérateur permet d'effectuer des transformations morphologiques aux objets du flux, comme par exemple une opération de surfaçage d'une pièce, perçage, peinture, contrôle de qualité, mesure, ... La réalisation de ce type d'opération est souvent accompagnée par un retard de l'objet sur lequel l'opération est appliquée. En conséquence, ce retard peut provoquer un ralentissement du flux d'objets. Ces transformations morphologiques n'ont pas d'impacts sur le rang d'objets du flux, elles n'ont pas donc d'impacts sur le motif.

Nous présentons cet opérateur par un rectangle avec deux ports présentant l'entrée et la sortie de l'opération de transformation (Figure 29).



**Figure 29. Représentation graphique du Transformer objet**

Paramètres et variables au niveau d'objet du flux

L'objet traversant une transformation est caractérisé par les paramètres suivants :

- son type
- ses caractéristiques morpho dimensionnelles
- l'ordre de transformation qui définit les paramètres de réalisation de l'opération de transformation : date de début, date de fin,
- la gamme de transformation d'objet qui définit la succession des tâches composant l'opération de transformation et la durée attribuée pour chacune des tâches.
- durée de transformation d'objet : c'est le temps nécessaire pour réaliser la transformation d'objet.

La gamme et la durée de l'opération de transformation sont déterminées en fonction de l'objet même et du support réalisant l'opération de transformation.

Les variables d'objet observées à travers cet opérateur sont :

- la vitesse d'objet : (dans le cas d'opérations au défilé ou à la volée)
- la position, l'orientation

Variables au niveau du flux même

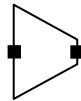
Les variables du flux pouvant être observées sont :

- la vitesse moyenne
- le débit d'entrée
- le débit de sortie

### ***Assembler objets***

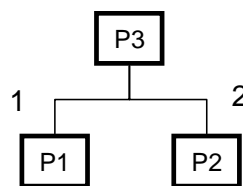
Cet opérateur permet de représenter l'assemblage des objets du flux (un objet en sortie de cet opérateur est le produit d'au moins deux objets en entrée).

Nous présentons cet opérateur par un trapèze avec deux ports présentant l'entrée et la sortie de l'opération d'assemblage effectuée par l'opérateur (Figure 30).



**Figure 30. Représentation graphique de l'Assemblage objets**

Comme nous l'avons décrit dans le paragraphe précédent, l'opération d'assemblage impacte directement des caractéristiques fondamentales de l'objet. La réalisation de cette opération est contrôlée par la gamme d'assemblage qui définit la succession des tâches à effectuer. La gamme est définie en fonction de la nomenclature d'assemblage<sup>14</sup> qui représente la liste des objets (sous composants, pièces, ...) nécessaire à la réalisation de l'objet final assemblé à la sortie de cette opération. Par exemple la Figure 31 montre la nomenclature d'assemblage du produit P<sub>3</sub> qui est composé de 1 sous composant P<sub>1</sub> et 2 composants de P<sub>2</sub>.



**Figure 31. Nomenclature d'assemblage du produit P3**

Paramètres et variables au niveau d'objet du flux

Les paramètres caractérisant l'objet entrant à cette opération sont :

- son type
- ses caractéristiques morpo dimensionnelles

---

<sup>14</sup> Une nomenclature est une arborescence d'objets constituée par des nœuds de même nature et ayant des liens de composition entre eux [Gzara 00]

- la gamme d'assemblage d'objet qui définit la succession des tâches composant l'opération d'assemblage et la durée attribuée pour chacune des tâches.
- durée d'assemblage d'objet qui représente le temps nécessaire pour réaliser l'opération d'assemblage sous la condition de la disponibilité de tous les sous composants de l'objet assemblé.
- nomenclature d'assemblage qui définit la liste d'objets (sous composants) et la quantité nécessaire de chaque objet pour réaliser l'opération d'assemblage.

La gamme et la durée de l'opération d'assemblage sont déterminées en fonction de l'objet même et du support réalisant l'opération.

Paramètres et variables au niveau du flux

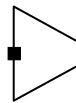
Le paramètre le plus important pour le flux entrant à cette opération est le motif du flux entrant puisqu'il est un facteur déterminant pour la réalisation de l'opération d'assemblage.

Comme dans les autres opérateurs, les variables observées du flux traversant cette opération sont :

- la vitesse moyenne
- le débit d'entrée
- le débit de sortie
- la densité

**Cas spécial :**

Cet opérateur peut représenter un puits. Pour cela, l'opérateur sera doté d'un seul port d'entrée et il n'y a pas de port de sortie en aval (Figure 32).

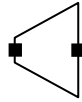


**Figure 32. Représentation graphique du Puits objets**

**Désassembler objets** (dont cas de source, on enlève le port aval)

Cet opérateur permet de représenter le désassemblage des objets du flux (un objet en entrée de cet opérateur produit au moins deux objets en sortie).

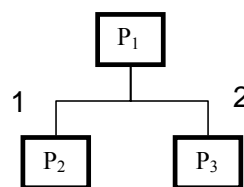
Nous présentons cet opérateur par un trapèze avec deux connecteurs présentant l'entrée et la sortie de l'opération de désassemblage effectuée par l'opérateur (Figure 33).



**Figure 33. Représentation graphique du Désassemblage objets**

L'opération de désassemblage impacte directement les caractéristiques de l'objet(s). La réalisation de cette opération est contrôlée, comme l'opération d'assemblage, par la gamme de désassemblage qui définit la succession des tâches à effectuer. La gamme est définie en fonction de la nomenclature de désassemblage qui représente ici la liste d'objet(s) (sous composants, pièces, ...) résultant du désassemblage de l'objet à l'entrée de cette opération.

Par exemple, la Figure 34 montre la nomenclature de désassemblage du produit  $P_1$  qui se décompose en 1 Produit  $P_2$  et 2 produits  $P_3$ .



**Figure 34. Nomenclature de désassemblage de  $P_1$**

Paramètres et variables au niveau d'objet du flux

Les paramètres caractérisant l'objet entrant à cette opération sont :

- son type
- ses caractéristiques morfo dimensionnelles
- la gamme de désassemblage d'objet qui définit la succession des tâches composant l'opération de désassemblage et la durée attribuée pour chacune des tâches.
- durée de désassemblage d'objet qui représente le temps nécessaire pour réaliser l'opération de désassemblage.
- nomenclature de désassemblage qui définit la liste d'objets (sous composants) et la quantité de chaque objet résultant de l'opération de désassemblage.

La gamme et la durée de l'opération de désassemblage sont déterminées en fonction de l'objet même et du support réalisant l'opération.

Paramètres et variables au niveau du flux

Le paramètre le plus important pour le flux sortant de cette opération est le motif du flux sortant.

Comme dans les autres opérateurs, les variables observées du flux traversant cette opération sont :

- la vitesse moyenne

- le débit d'entrée
- le débit de sortie
- la densité

### ***Cas spécial :***

Cet opérateur peut représenter une source : pour cela l'opérateur sera doté d'un seul port de sortie et il n'y a pas de port d'entrée en amont (Figure 35).



**Figure 35. Représentation graphique de la Source objets**

## **3.2.2 Les opérateurs simples du flux**

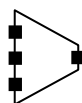
Les opérateurs simples du flux permettent d'effectuer des opérations sur le flux même. Nous proposons deux types d'opérateurs au niveau du flux :

- convergence représentant l'assemblage des flux
- divergence représentant le désassemblage de flux

Les effets des opérations réalisées par ces opérateurs visent spécialement le flux en modifiant sa structure interne. Un opérateur est caractérisé par un ensemble des paramètres comme par exemple : la durée de l'opération, la capacité, caractéristiques morpo dimensionnelles, ... Ces paramètres varient en fonction du type de technologie utilisée. Nous définissons pour chaque opérateur les variables et les paramètres caractérisant les objets et le flux utiles et/ou modifiés par l'opérateur. Les variables citées font référence aux définitions présentées au chapitre II.

***Convergence*** = assembler des flux

L'opérateur convergence permet d'assembler un ensemble des flux (au moins deux) en un flux tout en respectant la loi de conservation de la matière. Nous présentons cet opérateur par un trapèze avec des ports (au moins deux) à l'entrée et un port à la sortie (Figure 36). Le nombre de ports à l'entrée de l'opérateur convergence représente le nombre de flux pouvant être assemblés par cet opérateur. Les effets de cette opération impactent directement des caractéristiques fondamentales du flux.



**Figure 36. Représentation graphique de la Convergence flux "Assemblage flux"**

## Paramètres et variables au niveau d'objet du flux

Les paramètres caractérisant l'objet entrant à cette opération sont :

- son type
- ses caractéristiques morpho dimensionnelles

Nous pouvons observer les variables d'objet suivantes :

- la vitesse d'objet
- la position
- l'espacement amont et aval
- le rang

## Paramètres et variables au niveau du flux

Les paramètres caractérisant le flux et qui contrôlent la réalisation de l'opération de convergence sont :

- la gamme de convergence qui définit l'ordre et la règle pour la construction de la séquence des objets constituant le flux assemblé.
- la nomenclature de convergence qui définit la liste des objets constituant le flux assemblé sortant de cette opération. Par exemple la Figure 37 montre la nomenclature de convergence du flux  $F_{ass}$  qui est composé de  $i$  produits du flux  $F_1$ ,  $j$  produits du flux  $F_2$ , ... et  $k$  produits du flux  $F_k$ . Les  $i$  produits de  $F_1$  sont composés de  $(n_1)$  produit de type  $P_1$  et  $(n_i)$  produits de type  $P_i$ .

En d'autre terme cet opérateur permet d'assembler et de générer un motif à partir d'un ensemble d'objets d'au moins deux flux. Ce motif est défini en fonction de la gamme et la nomenclature de convergence.

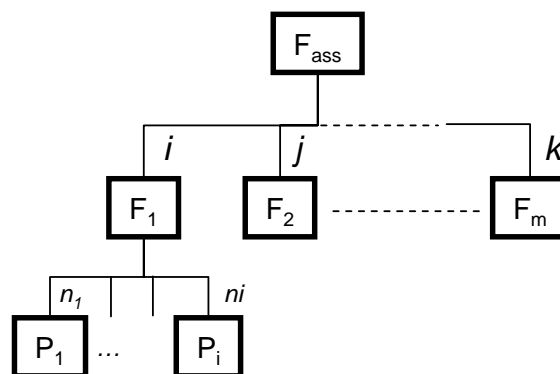


Figure 37. Nomenclature de convergence pour l'assemblage du flux  $F_{ass}$

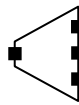
Les variables observées du flux sont :

- la vitesse moyenne
- les débits d'entrée
- le débit de sortie

- le motif de sortie

Divergence = désassembler des flux

A l'inverse de l'opérateur de convergence, l'opérateur divergence permet de désassembler un flux en ensemble des flux (au moins deux) tout en respectant la loi de conservation de la matière. Nous présentons cet opérateur par un trapèze avec un port à l'entrée et des ports (au moins deux) à la sortie (Figure 38). Le nombre de ports à la sortie de l'opérateur divergence représente le nombre de flux désassemblés sortant de cet opérateur. Les effets de cette opération impactent également des caractéristiques fondamentales du flux.



**Figure 38. Représentation graphique de la Divergence flux "Désassemblage flux"**

Paramètres et variables au niveau d'objet du flux

Les paramètres caractérisant l'objet entrant à cette opération sont :

- son type
- ses caractéristiques morfo dimensionnelles

Nous pouvons observer les variables d'objet suivantes :

- la vitesse d'objet
- la position
- l'espacement amont et aval
- le rang

Paramètres et variables au niveau du flux

Les paramètres caractérisant le flux et qui contrôlent la réalisation de l'opération de divergence sont :

- la gamme de divergence qui définit l'ordre et la règle pour la construction de la séquence des objets constituant chaque flux désassemblé.
- la nomenclature de divergence qui définit la liste des objets constituant les flux désassemblés sortant de cette opération. La Figure 39 montre la nomenclature de divergence pour le désassemblage de flux  $F_{\text{désass}}$  qui est décomposé en  $i_1$  produits dans le flux  $F_1$ ,  $i_2$  produits dans le flux  $F_2$ , ..., et  $i_k$  produits dans le flux  $F_m$ .

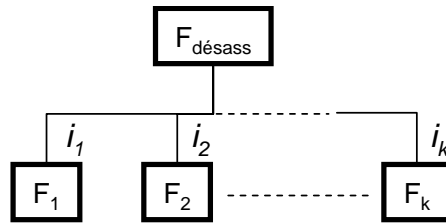


Figure 39. Nomenclature de divergence pour le désassemblage du flux  $F_{\text{désass}}$

Les variables observées du flux sont :

- la vitesse moyenne
- le débit d'entrée
- les débits de sortie
- le motif de sortie

### 3.2.3 Les opérateurs composites du flux

Les opérateurs composites du flux permettent d'effectuer des opérations sur les objets du flux et sur le flux même. Nous proposons ici deux types d'opérateurs :

- Transformer flux
- Circulation composite

Les effets des opérations réalisées par ces opérateurs visent non seulement le flux mais également les objets du flux. Comme les autres opérateurs, un opérateur composite est caractérisé par un ensemble des paramètres e.g. la durée de l'opération, la capacité, caractéristiques morfo dimensionnelles, ... Ces paramètres varient en fonction du type de technologie utilisée. Nous définissons pour chaque opérateur les variables et les paramètres des objets et du flux utiles et/ou modifiés par l'opérateur. Les variables citées font références aux définitions présentées au chapitre II.

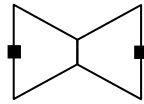
#### *Transformer flux*

La transformation d'un flux est par nature une modification de la forme de celui-ci. Elle modifie la structure même du flux, c'est-à-dire son motif. Elle est, à notre sens, le résultat d'un stockage puis d'un déstockage des objets du flux. Le stockage d'objet peut être représenté par un assemblage, même si celui-ci n'a pas pour vocation à avoir une durée limitée. Le déstockage correspond pour sa part à un désassemblage des objets afin de « construire » un flux sortant avec un motif particulier. Nous représentons donc cet opérateur par une succession de deux opérations ; assemblage puis désassemblage d'objets. Il est représenté par deux trapèzes connectés entre eux par leurs petites bases (Figure 40). Ce même opérateur modélise deux aspects différents :

- Le stockage –déstockage des objets du flux
- La transformation du flux (modification du motif)

On suppose ici que ces opérations sont réalisées sans mouvement des objets (vision statique).





**Figure 40. Représentation graphique du Transformer flux**

Paramètres et variables au niveau d'objet du flux

Les paramètres caractérisant les objets entrant dans cette opération sont :

- leur type
- leurs caractéristiques morpho dimensionnelles

Les variables d'objet observées à travers cet opérateur sont

- la vitesse d'objet qui représente son avancement au défilé de l'opération.
- la position
- l'espacement amont et aval
- le rang

Paramètres et variables au niveau du flux

Les paramètres caractérisant le flux entrant à cet opérateur sont :

- la gamme de transformation flux (assemblage puis désassemblage) qui définit la succession des tâches composant l'opération de transformation et la durée attribuée pour chacune des tâches
- la durée de transformation du flux qui représente le temps nécessaire pour réaliser l'opération de transformation
- la nomenclature de transformation qui définit la liste d'objets et la quantité nécessaire de chaque type objet pour construire le motif du flux sortant de cette opération.

La gamme et la durée de l'opération de transformation de flux sont déterminées en fonction de l'objet même et du support réalisant l'opération. La gamme et la nomenclature de transformation flux définissent le motif du flux sortant de cet opérateur.

Les variables du flux, observées à travers cet opérateur, sont :

- la vitesse moyenne
- le débit d'entrée
- le débit de sortie
- la densité
- le motif de sortie

Exemple d'utilisation : Stock tampon entre deux machines (Figure 41)

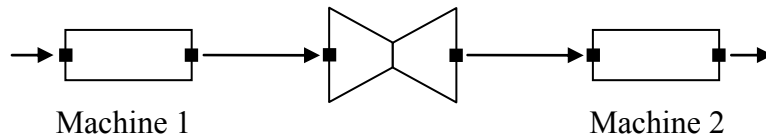


Figure 41. Exemple d'utilisation de transformer flux comme un stock tampon entre deux machines

### *Circulation composite*

La circulation composite est une vision dynamique de la transformation du flux. Cet opérateur mixte la circulation simple à la transformation du flux. Elle permet donc de représenter des changements de motifs effectués lors de transfert de produits.

Nous présentons cet opérateur par deux trapèzes connectés par leurs petites bases et une flèche au milieu (Figure 42).

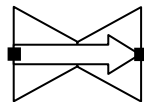


Figure 42. Représentation graphique de la circulation composite

Paramètres et variables au niveau d'objet du flux

Les paramètres caractérisant l'objet entrant à cette opération sont :

- son type
- ses caractéristiques morpo dimensionnelles

Les variables d'objet, observées à travers cet opérateur, sont

- la vitesse d'objet
- la position
- l'espacement amont et aval
- le rang

Paramètres et variables au niveau du flux

Les paramètres caractérisant le flux entrant à cet opérateur sont :

- la gamme de transformation flux (assemblage puis désassemblage) qui définit la succession des tâches composant l'opération de transformation et la durée attribuée pour chacune des tâches.

- durée de transformation du flux qui représente le temps nécessaire pour réaliser l'opération de transformation.
- nomenclature de transformation qui définit la liste d'objets et la quantité nécessaire de chaque type objet pour construire le motif du flux sortant de cette opération.

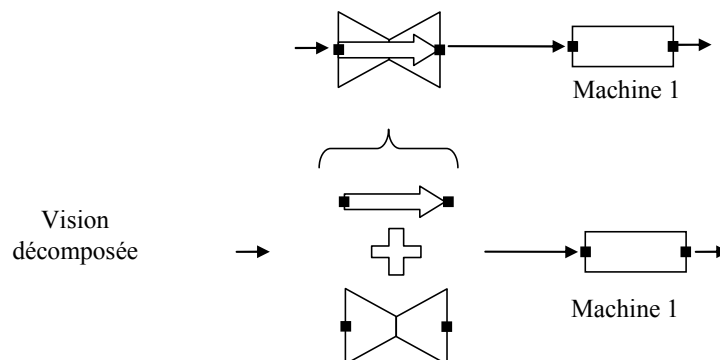
La gamme et la durée de l'opération de transformation de flux sont déterminées en fonction de l'objet même et du support réalisant l'opération. Comme pour l'opérateur transformer flux, la gamme et la nomenclature du flux y définissent le motif du flux sortant de cet opérateur.

Les variables du flux, observées à travers cet opérateur, sont :

- la vitesse moyenne
- le débit d'entrée
- le débit de sortie
- la densité
- le motif

Exemple d'utilisation :

Une circulation composite effectuée sur un flux représente la réalisation à la fois de deux opérations en même temps : transformation du flux et une circulation simple.



**Figure 43. Décomposition de la circulation composite en deux opérateurs appliqués simultanément sur le flux : circulation simple et transformer flux**

### 3.2.4 Quelques exemples

Selon les notations que nous avons présentées précédemment nous présentons deux exemples des cas d'utilisation :

Cas1 : Stocks FIFO en parallèle (stock à tiroirs)

Le stock à tiroirs est un stock composé de files d'attentes en parallèles fonctionnant en FIFO. A chaque instant, lorsque le stock est chargé, le nombre d'objets ou de produits accessibles est

égal au nombre de tiroirs [Muhl 02]. Un tel type de stock peut être représenté par la succession d'opérateurs suivant : divergence flux puis assembler objet (assemblage virtuel de produits dans chaque tiroirs) et en fin convergence de flux (Figure 44).

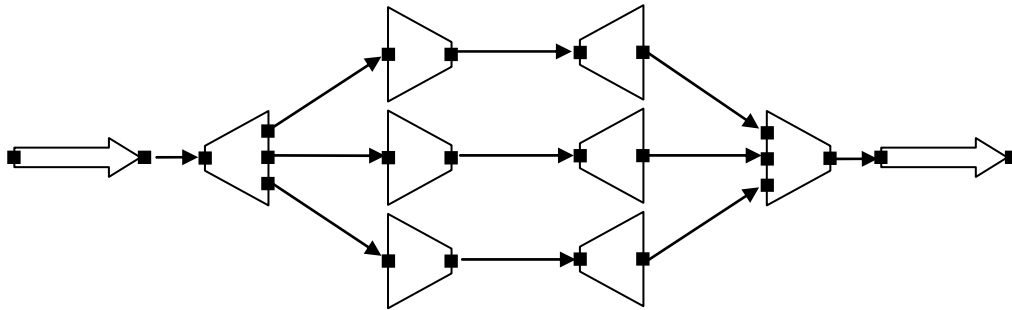


Figure 44. Exemple, stock à 3 tiroirs

Cas 2 : cas d'un stock alvéolaire (stocks à accès libre)

C'est un magasin dans lequel tous les objets entreposés sont rapidement et également accessibles. Le stock ici est composé d'un nombre de cellules, appelées alvéoles pouvant contenir chacun un objet. Ce type de stock permet de réordonnancer l'ensemble des objets qui y sont présents car chaque objet est accessible individuellement. Ce type de stock est très connu et utilisé dans l'industrie automobile [Muhl 02]. Ce stock alvéolaire peut être représenté par la succession d'opérateurs suivants : divergence flux suivi par assembler objet (assemblage virtuel de produits dans chaque tiroirs) puis transformer flux et en fin convergence de flux (Figure 45).

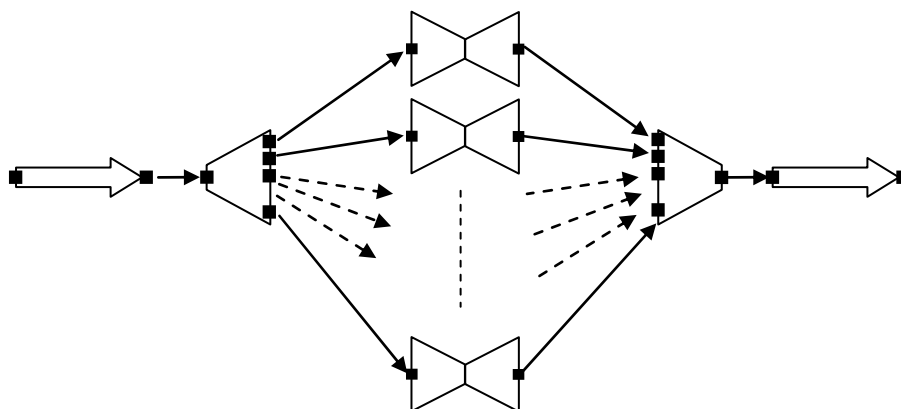


Figure 45. Exemple, stock à n alvéoles

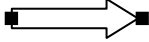



### 3.3 Règles de construction de modèles de flux

L'utilisation des opérateurs présentés précédemment pour la présentation graphique de flux physiques doit approuver et obéir aux règles de construction suivantes :

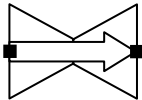
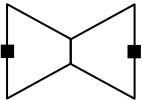
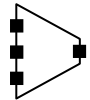
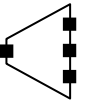
- un flux commence par une source et finit par un puits
- une circulation simple ou composite doit toujours être précédée par une source ou par un des opérateurs au niveau objet (transformer objet, assembler objets, désassembler objet) ou de niveau du flux (transformer flux, convergence, divergence).
- une circulation simple ou composite doit être toujours suivie par un puits ou par un des opérateurs de niveau objet (transformer objet, assembler objets, désassembler objet) ou de niveau du flux (transformer flux, convergence, divergence).
- les objets ne peuvent pas circuler contre le sens de la flèche de la circulation (en sens inverse)
- pour chaque opérateur le(s) port(s) d'entrée ne peut pas jouer le rôle d'un port de sortie et vice versa.

Une synthèse de l'ensemble de ces opérateurs au niveau d'objet du flux et au niveau du flux est fait dans le Tableau 6 et le Tableau 7.

**Tableau 6. Synthèse des opérateurs au niveau d'objets du flux**

	<b>Circulation simple</b>	<b>Transformer objet</b>	<b>Assembler objets</b>	<b>Désassembler objets</b>
<b>Variables d'objets</b>	Vitesse d'objets Position - Orientation Espacement amont Espacement aval Rang	Vitesse d'objet (son avancement dans l'opération de transformation) Position - orientation	Vitesse d'objet (l'avancement du déroulement de l'opération). Elle est limitée à l'opération au défilé	Vitesse d'objet (l'avancement du déroulement de l'opération)
<b>Variables du flux</b>	$(v_{c\_f})$ vitesse moyenne $(q_{c\_in})$ débit entrée. $(q_{c\_out})$ débit sortie $(d_c)$ densité flux	$(v_{to})$ vitesse moyenne $(q_{to\_in})$ débit entrée $(q_{to\_out})$ débit sortie $(d_{to})$ densité	$(v_{ass})$ vitesse moyenne $(q_{ass\_in})$ débit entrée ass. $(q_{ass\_out})$ débit sortie ass. $(d_{ass})$ densité	$(v_{dés})$ vitesse moyenne $(q_{dés\_in})$ débit entrée désass. $(q_{dés\_out})$ débit sortie désass. $(d_{dés})$ densité
<b>Paramètres d'objets</b>	Morpho dimensionnelle Type	$(G_{to})$ Gamme transf. Obj. + $(t_{to})$ Durée transf. Obj Morpho-dimensionnelle Type	$(G_{ass})$ Gamme ass. + $(t_{ass})$ Durée ass $(N_{ass})$ Nomenclature ass. Morpho-dimensionnelle Type	$(G_{dés})$ Gamme désass. + $(t_{dés})$ Durée désass $(N_{dés})$ Nomenclature désass. Morpho-dimensionnelle Type
<b>Paramètres du flux</b>	Motif		Motif d'entrée (plus important) Motif de sortie	Motif d'entrée Motif de sortie (plus important)
<b>Symbole</b>				

**Tableau 7. Synthèse des opérateurs au niveau du flux**

	<b>Circulation composite</b>	<b>Transformer flux</b>	<b>Convergence flux</b>	<b>Divergence flux</b>
<b>Variable d'objets</b>	Vitesse d'objets Position Espacement amont Espacement aval Rang	Vitesse d'objets Position Espacement amont Espacement aval Rang	Vitesse d'objets Position Espacement amont Espacement aval Rang	Vitesse d'objets Position Espacement amont Espacement aval Rang
<b>Variables de flux</b>	$(v_{ccf})$ vitesse flux circ. com $(q_{cc\_in})$ débit entrée circ. com $(q_{cc\_out})$ débit sortie circ. com $(d_{cc})$ densité flux circ. com Motif	$(q_{tf\_in})$ débit entrée transf. F $(q_{tf\_out})$ débit sortie transf. F Motif	$(q_{con\_in})$ débit entrée conv. $(q_{conv\_out})$ débit sortie conv. Motif	$(q_{div\_in})$ débit entrée div. $(q_{div\_out})$ débit sortie div. Motif
<b>Paramètres d'objets</b>	Morpho-dimensionnelle Type	Morpho-dimensionnelle Type	Morpho-dimensionnelle Type	Morpho-dimensionnelle Type
<b>Paramètres de flux</b>	Motif (entrée – sortie)	$(N_{tf})$ Nomenclature transf. F	$(G_{con})$ Gamme conv. $(N_{con})$ Nomenclature conv.	$(G_{div})$ Gamme div. $(N_{div})$ Nomenclature div.
<b>Symbole</b>				

## 4 Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons abordé la notion de rang qui nous semblait importante afin de l'intégrer dans l'étude du flux manufacturier. Sur la base de cette notion nous avons défini l'indice de fluidité permettant d'évaluer la qualité de circulation d'objets dans le flux. Elle nous a permis également de définir le motif du flux manufacturier.

Nous avons proposé ensuite le tétraèdre de Paynter adapté au flux manufacturier. La définition des variables du tétraèdre et les relations entre elles nous ont permis d'avoir des nouveaux indicateurs potentiels du flux.

L'ensemble des variables définies dans les chapitres I et II a été intégré dans un modèle formel du flux. Ensuite nous avons proposé une classification d'opérateurs appliqués aux objets du flux et au flux lui-même. Nous avons identifié pour chaque opérateur les paramètres et les variables à observer pour les objets du flux et pour le flux lui-même.

Avec la proposition du modèle formel de flux et des différents opérateurs appliqués au flux et à ses objets, nous avons complété la définition des deux éléments « Observation et Action » de la boucle cybernétique de l'approche flux (c.f. ch.1 Fig.8). Nous testerons donc dans le chapitre 4 l'application de cette approche dans le cas d'un système réel.





# **Chapitre IV Modélisation du SFP de l'AIPL (Application)**



# 1 Introduction

L'objectif de ce chapitre est de mettre en œuvre pour validation partielle l'approche proposée du contrôle par le flux. Nous observerons et évaluerons les effets de ce contrôle sur le comportement du flux tout en assurant la cohérence du modèle logique des éléments le constituant.

Le système, objets de l'étude de ce dernier chapitre et sur lequel nous nous sommes focalisés, est le Système Flexible de Production (SFP) de l'Atelier Inter-établissements de Productique Lorrain (AIPL)<sup>15</sup>.

## 2 Plateforme de validation

L'AIPL est le centre de ressource régional du réseau national AIP-PRIMECA qui regroupe des pôles de compétence pluridisciplinaires autour de technologies innovantes. Le pôle AIP Lorrain se justifie comme support expérimental de formation approfondie dans le domaine de la productique et de la conception intégrée en mécaniques. Il est considéré comme une entreprise manufacturière qui fabrique des produits. L'assemblage de ces produits est fait par le SFP qui reproduit le processus d'assemblage de pièces mécaniques. Cet assemblage peut être effectué de divers façons sur les différents postes composant le SFP, afin d'obtenir les produits finaux.

### 2.1 Présentation du SFP

Les produits fabriqués sur le SFP sont relativement simples. Ces produits sont les résultats de l'assemblage de 2 à 4 pièces de forme cylindrique. Trois types de produits sont identifiés à la sortie de l'opération d'assemblage (Figure 46). :

- Produit 01, 09
- Produit 60, 88, 09
- Produit 60, 88, 11, 10

---

<sup>15</sup> <http://www.aip-primeca.net/lorraine/>

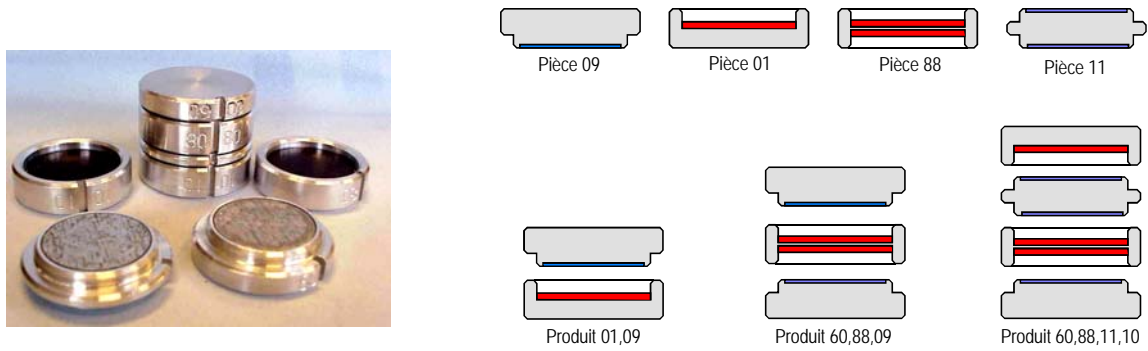


Figure 46. Les pièces et les produits assemblés : Exemples de pièces et de produits de type AIP

Le SFP est constitué de :

- 6 postes de travail reliés entre eux par un convoyeur de palette et permettant d'assembler un produit : un poste de chargement initialise le processus d'assemblage, quatre postes de travail identiques permettant l'orientation et l'assemblage des pièces. Enfin un poste à l'arrivée décharge la palette et contrôle la qualité du produit.
- Le système de commande de chaque poste est constitué d'un automate et d'un réseau de terrain. Le téléchargement et la mise au point du programme automate sont assurés par un réseau propriétaire. Un poste assure le pilotage et la supervision de la cellule. Il sert également de centralisateur de données via le réseau MPI 10.
- Des palettes qui transportent les pièces et les produits finis et qui sont équipées d'étiquettes électroniques permettant de stocker des informations sur les produits et l'avancement des opérations d'assemblage.
- Un réseau Profibus FMS peut être utilisé pour interconnecter les automates et le serveur DDE.
- Le réseau MPI ou le réseau Profibus FMS permettent d'échanger des informations avec le serveur OPC. L'interface normalisée OPC permet de connecter des clients OPC.

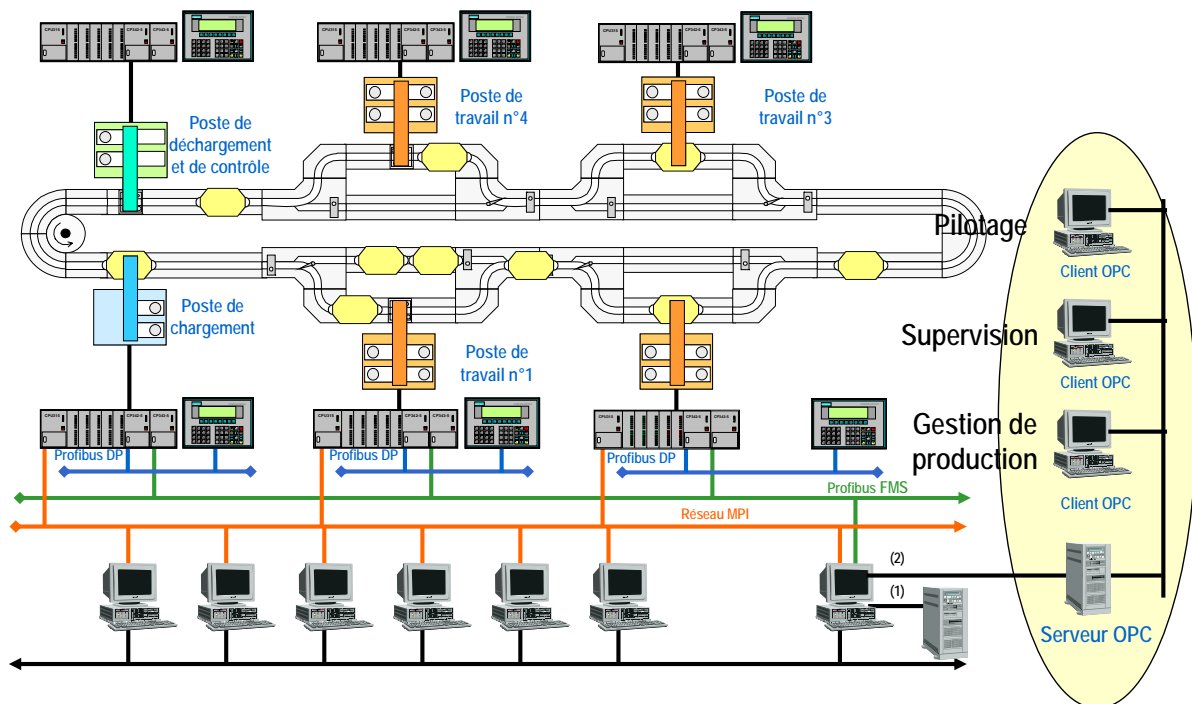


Figure 47. Système Flexible d'Assemblage

Les clients OPC sont des applicatifs associés à leur base de donnée (M.E.S.). Le MES exécute des ordres de fabrication provenant de la gestion globale de l'entreprise (ERP) et retourne des états de production.

## ***2.2 La gestion des flux de produits à l'A IPL***

Même si les postes de production sont flexibles, cette flexibilité se limite souvent à un choix de poste ou à un choix d'opérations que les postes sont capables de faire et qui ont été définies au préalable. Les outils de gestion de production tels que les MES et ERP, se basent entre autres sur les notions de nomenclatures, de routes de fabrication et/ou de gamme. Dans les ERP, comme par exemple Adonix X3, ces informations sont nécessaires au lancement des différents calculs de besoins nets, des temps nécessaires à la réalisation d'une production donnée, du Programme Directeur de Production... elles doivent donc être saisies pour chaque type de produit.

Le travail dans un contexte de personnalisation de produit et de production à la commande implique une intervention des automaticiens et de l'ingénierie produit/processus pour un redéveloppement partiel ou complet des programmes de contrôle/commande des processus de production. Cela, à son tour, a un impact sur la circulation des produits dans le flux. Les changements des routes de fabrication, de type d'opération et d'outils utilisés imposent des changements radicaux sur la circulation des produits et donc des changements des paramètres de flux.

Pour l'exemple du SFP, la commande d'un (des) produit(s) personnalisé(s) implique des changements d'informations sur le produit, des opérations à réaliser, des composants, ... Certains de ces changements ne sont pas pris en compte par FlexNet. La flexibilité du système laisse la possibilité, en fonction de l'état des postes de travail et de la disponibilité des composants, de rediriger une palette vers un poste libre contenant les sous composants nécessaires. Cette flexibilité rend le système plus réactif face aux changements, et assure la réalisation de l'opération et le produit demandé, mais elle n'est pas suffisante pour assurer la bonne circulation des produits dans le flux et donc l'optimisation de flux. En fait, la commande de production d'un produit personnalisé ne peut pas être intégrée dans la gestion de flux, c'est pourquoi les changements engendrés par cette flexibilité peuvent aboutir, dans certains cas, à un comportement indésirable et à des problèmes empêchant la maîtrise et l'optimisation des flux (e.g. un problème de saturation de flux, augmentation du nombre de palettes rentrant dans le système).

## ***2.3 Conclusion sur le cadre de travail du l'A IPL***

Le SFP, dans son état actuel, n'est pas capable de faire face à de nouveaux modes de production : production à la commande et personnalisation de produit. Nous pouvons résumer les raisons de cette limitation :

- manque d'information sur le flux de produits et manque d'analyse des effets de certaines décisions prises grâce à la flexibilité du système qui rend la maîtrise et l'optimisation des flux difficile
- non exploitation de la capacité du flux à absorber certains de ses changements, e.g. la variation du débit de produits, la variation de densité sur certains convoyeurs, ...

Dans notre travail nous cherchons à améliorer et à optimiser l'écoulement des flux :

- en fournissant plus d'information sur le flux et sur l'évolution de ses variables tout en exploitant ces informations dans la prise de décision
- en exploitant certaines variables de flux, actuellement non exploitées, comme par exemple la vitesse de convoyeur qui est constante et prédéfinie.

### **3 Etude de flux dans le SFP**

Le flux dans le SFP peut être décomposé en sous flux reliant les quatre postes de travail chargés des opérations d'assemblage. Les postes de chargement et de déchargement sont considérés comme de simples source et puits ; l'analyse se focalise donc sur les quatre postes d'assemblage. Les données et paramètres du système sont les suivantes :

#### **Convoyeurs**

8 petits convoyeurs d'une longueur de 140 cm et d'une capacité maximale de 4 palettes reliant les postes de travail (Figure 48)

2 grands convoyeurs d'une longueur de 280 cm et d'une capacité maximale de 8 palettes reliant les postes 2 et 3 et les postes de chargement et de déchargement des palettes.

L'ensemble de ces convoyeurs circule avec une vitesse nominale de 15,4 cm/sec.

#### **Poste de travail**

L'opération d'assemblage du produit peut être effectuée indifféremment sur l'un des quatre postes du SFP. Chacun de ces quatre postes possède une file d'attente de capacité maximum de 4 palettes.

Pour tenir compte de la variabilité des temps de traitement de différents types de produits à assembler sur un poste de travail, nous nous modélisons ce temps de traitement par une loi triangulaire = TRIA (80, 90, 100) sec/palette. Cela nous permettra plus tard de présenter cette opération comme une opération de transformation simple.

#### **Palettes**

Longueur de la palette = 35 cm

Capacité de la palette = 4 produits

Loi d'arrivée des sous composants = TRIA (4, 5, 6) sec/sous composant

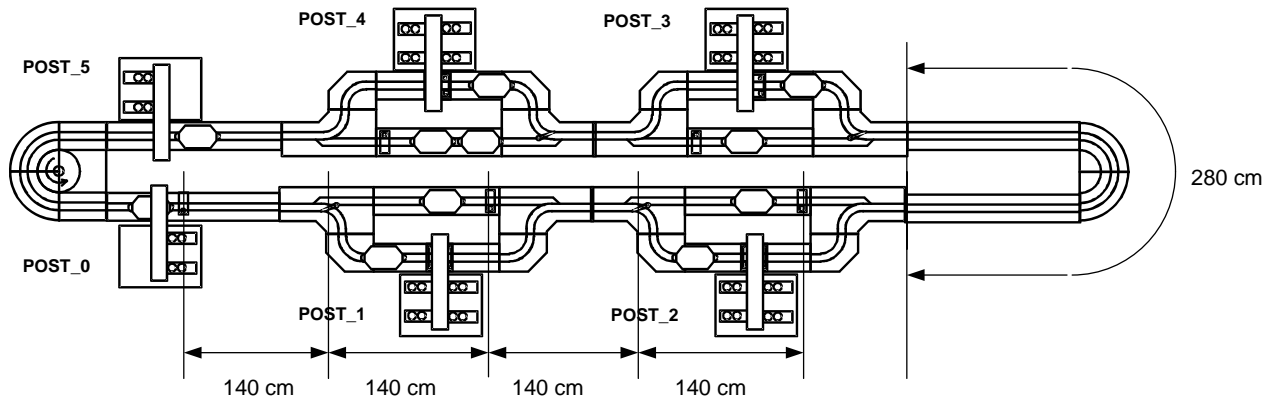


Figure 48. Synoptique du SFP

### Schématisation des flux du SFP

L'analyse des flux physiques du SFP montre bien l'existence d'une série d'opérations appliquées aux flux (convergence et divergence) ainsi que d'une opération d'assemblage qui est appliquée aux produits. Le modèle du SFP, proposé sur la base des opérateurs précédemment définis, est présenté par la Figure 49.

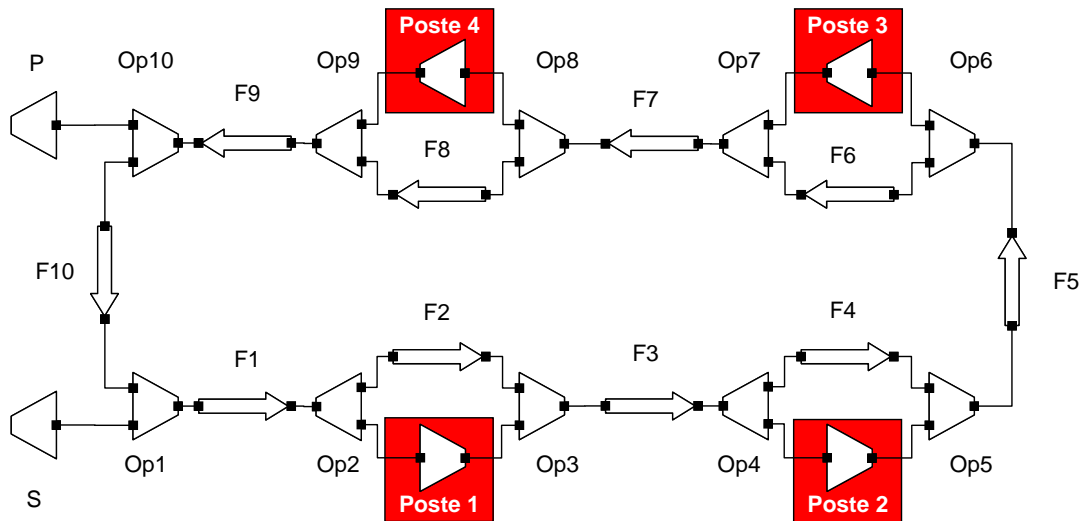


Figure 49. Schématisation du SFP

Il représente :

- 4 opérations d'assemblage au niveau du produit sur les postes 1, 2, 3 et 4. Ces opérations seront présentées comme des opérations de transformation objets car tous les sous-composants d'un même produit sont, au chargement, disposés sur la palette (Figure 50).



- 10 opérations au niveau du flux représentent les aiguillages effectués à l'entrée et à la sortie du poste de travail :
  - o 5 opérations d'assemblage des flux (convergence) : Op<sub>1</sub>, Op<sub>3</sub>, Op<sub>5</sub>, Op<sub>7</sub>, Op<sub>9</sub> ;
  - o 5 opérations de désassemblage de flux (divergence) : Op<sub>2</sub>, Op<sub>4</sub>, Op<sub>6</sub>, Op<sub>8</sub>, Op<sub>10</sub> ;
- 10 circulations reliant ces opérations.
- Une source et un puits.

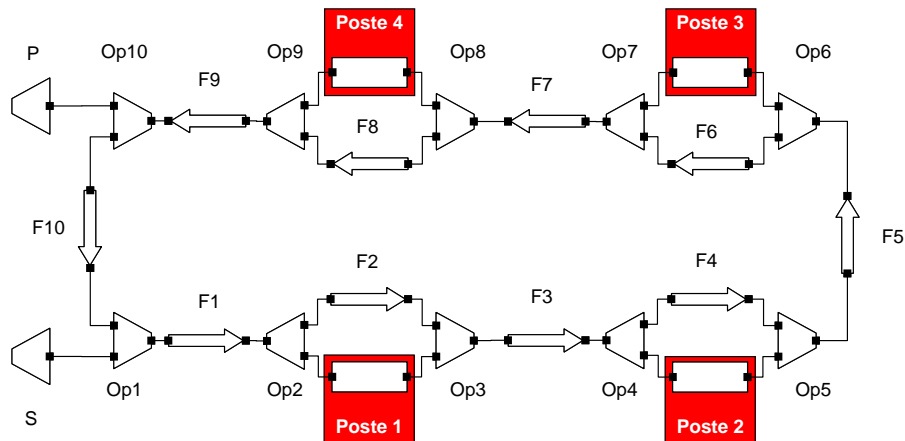


Figure 50. Schématisation du SFP modélisé par ARENA

Les paramètres des composants du flux du SFP et les variables à observer sont présentés dans le Tableau 8

	Source	Puits	Circulations		Transformer objets Poste 1, 2, 3, et 4	Convergence Op <sub>1</sub> , Op <sub>3</sub> , Op <sub>5</sub> , Op <sub>7</sub> , Op <sub>9</sub>	Divergence Op <sub>2</sub> , Op <sub>4</sub> , Op <sub>6</sub> , Op <sub>8</sub> , Op <sub>10</sub>
			F <sub>1</sub> , F <sub>2</sub> , F <sub>3</sub> , F <sub>4</sub> , F <sub>6</sub> , F <sub>7</sub> , F <sub>8</sub> , F <sub>9</sub>	F <sub>5</sub> , F <sub>10</sub>			
Paramètres	$T_{source} = \text{TRIA}(4,5,6) \text{ sec}$ $C_{source\_al} = \text{Infinie}$	$T_{puits} = 0$ $C_{puits\_ab} = \text{Infinie}$	$V_{c\_max} = 15.4 \text{ cm/sec}$ $C_{c\_max} = 4 \text{ palettes}$	$V_{c\_max} = 15.4 \text{ cm/sec}$ $C_{c\_max} = 8 \text{ palettes}$	$T_{to} = \text{TRIA}(80,90,100) \text{ sec.}$ $C_{to\_ab} = 1 \text{ palette.}$ $C_{to\_al} = 1 \text{ Palette}$ $C_{to\_max} = 2 \text{ palettes}$	$T_{con} = 35/15.4 = 2.27 \text{ sec.}$ $G_{con}$ : priorité aux produits non finis. $C_{con\_ab} = 2 \text{ flux.}$ $C_{con\_al} = 1 \text{ flux}$	$T_{div} = 0$ $G_{div}$ : en fonction de l'état du poste de travail $C_{div\_ab} = 1 \text{ flux}$ $C_{div\_al} = 2 \text{ flux}$
Variables à observer	$(t_{source})$ $(q_{source})$	$(t_{puits})$ $(q_{puits})$	$(v_{c\_f})$ $(q_{c\_in})$ $(q_{c\_out})$ $(c_c)$ $(d_c)$	$(v_{c\_f})$ $(q_{c\_in})$ $(q_{c\_out})$ $(c_c)$ $(d_c)$	$(t_{to})$ $(q_{to\_in})$ $(q_{to\_out})$ $(c_{to})$	$(t_{con})$ $(q_{con\_in})$ $(q_{con\_out})$	$(t_{div})$ $(q_{div\_in})$ $(q_{div\_out})$

Tableau 8. Les paramètres définis et les variables à observer dans le flux du SFP

## Modèle du SFP sous ARENA

Pour modéliser et simuler le SFP, nous avons utilisé logiciel ARENA®<sup>16</sup>. La décomposition en opérateurs de flux, présentée précédemment, nous sert de base à la réalisation de notre modèle. Nous décrivons ci-dessous chacun de ces opérateurs dans le formalisme propre à ARENA.

### Opération de transformation des produits

Le poste de travail effectuant l'opération de transformation de produits est présenté par une succession des blocs "Seize", "Scan", "Delay", "Release" et un bloc "Assign" afin d'évaluer et/ou afficher quelques attributs et variables du flux (Figure 51).

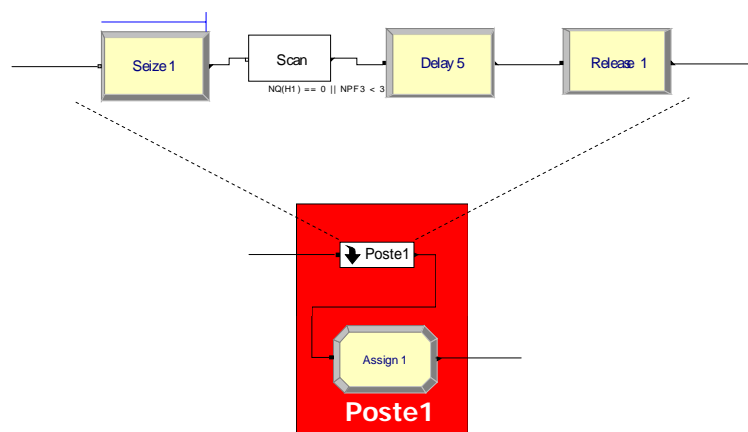


Figure 51. L'opération de transformation des produits

### Opération de convergence (assemblage des flux)

L'assemblage des flux est réalisé en utilisant des files d'attente "Queue", un bloc de "QPick", un bloc "Seize" et une opération simple "Process". L'ensemble de ces éléments assure le déroulement de l'opération d'assemblage de flux tout en respectant les conditions spatio-temporelles et la règle (ou la logique) appliquée pour réaliser cette opération (Figure 52) :

- Queue : le nombre de files d'attente correspond au nombre de flux convergents, la capacité définit le nombre de produits pouvant s'accumuler dans la file d'attente.
- QPick : il assure l'application de la règle ou de la logique adoptée pour la construction du motif du flux de sortie, ex. SNQ, HNQ, CYC, ...
- Seize et Process : permettent la préemption de l'opérateur d'assemblage pour une durée pouvant être fonction de caractéristiques des produits ; comme par exemple leur longueur.

<sup>16</sup> <http://www.arenasimulation.com/>

Dans notre exemple, la règle appliquée pour QPick consiste à donner la priorité de passage :

- aux palettes contenant les produits assemblés sortant du poste de travail dans le cas de (Op<sub>3</sub>, Op<sub>5</sub>, Op<sub>7</sub>, Op<sub>9</sub>) par rapport à la circulation entrant à cette opération de convergence (e.g. sur l'opération Op<sub>3</sub> la priorité est donnée aux palettes sortant du Poste 1 par rapport à ceux sortant du convoyeur F<sub>2</sub>) ;
- aux produits non assemblés qui font un tour supplémentaire à cause de non disponibilité des postes de travail, le cas de (Op<sub>1</sub>.) par rapport à la source S (Voir Figure 50).

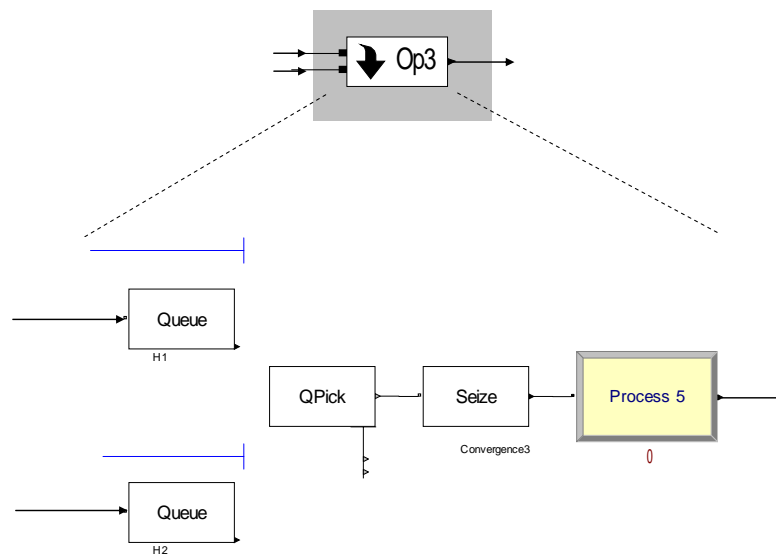


Figure 52. L'opération de convergence

### Opération de divergence

L'opération de divergence s'effectue selon deux conditions complémentaires. Chacune d'elles est modélisée par un bloc "Decide". Le premier bloc, en fonction de l'état du produit (déjà assemblé ou pas) l'oriente ou non vers l'opération d'assemblage. Le deuxième bloc pour sa part oriente ou non le produit vers le poste de travail en fonction de sa disponibilité (Figure 53).

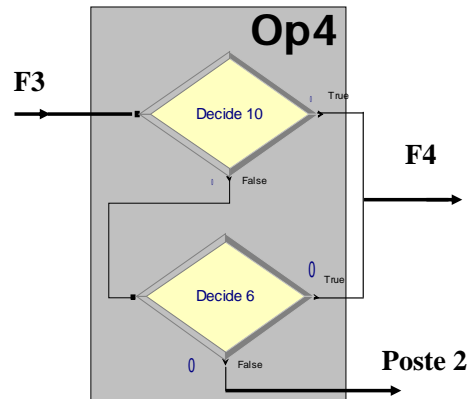


Figure 53. L'opération de divergence

### La circulation

Les convoyeurs sont représentés par une agrégation d'un ensemble de blocs ARENA (Figure 54) :

- des stations d'entrée et de sortie de convoyeur
- un convoyeur
- l'accès au convoyeur
- la sortie du convoyeur
- des blocs "Assign" et "Record"

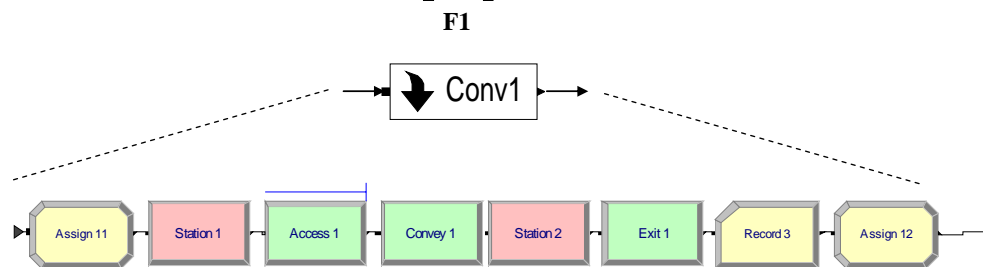


Figure 54. La circulation

### Scénarios de simulation

L'ensemble des convoyeurs du SFP possède la même vitesse. Pour appliquer notre approche de contrôle par le flux nous avons choisi de contrôler la vitesse des convoyeurs séparément : chaque convoyeur possèdera sa propre vitesse qui sera définie en fonction de conditions sur les variables d'état du flux. Ce contrôle de la vitesse des convoyeurs est un moyen indirecte de contrôle des autres variables du flux, comme par exemple le débit et la densité, ... Nous avons choisi de jouer sur cette variable, car c'est à notre sens la solution la plus facilement implémentable sur le SFP, les modifications à y apporter seraient en effet limitées.

Le comportement du SFP sera étudié dans deux cas :

- Cas 1 : SFP sans le contrôle par le flux (l'état actuel du système) ;
- Cas 2 : SFP avec le contrôle du flux par le contrôle de la vitesse de convoyeurs ;

Le cas 1 nous sert de cas de référence. Il nous permettra de comparer les résultats obtenus par le contrôle du flux avec ceux du système dans son état actuel.

Aucune variation de vitesse de convoyeur n'a lieu. Cette vitesse est conservée à la valeur de 15,4 cm/sec pour tous les convoyeurs et pendant toute la simulation.

Le cas 2 sera abordé au travers deux politiques de contrôle différentes, donnant lieu à des scénarios différents à étudier.

Quels que soient les scénarios étudiés, les mesures effectuées porteront sur les variables suivantes :

- Flow Time (date de sortie du SFP – Date d'entrée au SFP) moyen pour 1000 produits assemblés
- $C_{\max}$  (ou makespan) pour l'assemblage de 1000 produits
- Nombre de tours supplémentaires effectués par produit (si l'on considère qu'un produit peut être réalisé pour un seul tour du SFP)

Ensuite nous étudions les diagrammes fondamentaux caractérisant le comportement des flux afin d'identifier le débit maximum correspondant à la densité critique.

L'objectif est de comprendre le comportement du SFP et de trouver la politique permettant d'avoir le meilleur point de fonctionnement par rapport aux variables observées.

## 4 Résultats de simulation

### 4.1 Sans le contrôle par le flux

L'augmentation du nombre de palettes disponibles dans le système permet de diminuer le  $C_{\max}$ . Il se forme cependant une forme de palier, à partir duquel, une augmentation du nombre de palettes n'améliore quasiment plus ces temps de simulation (à partir de 21 palettes) (Figure 55).

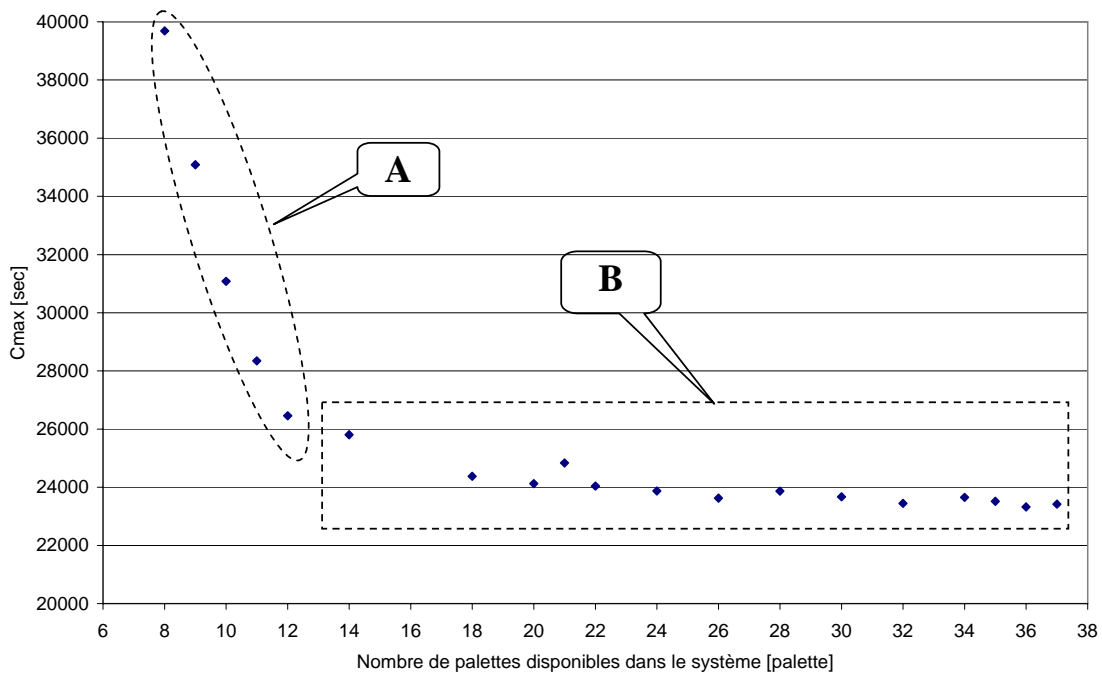
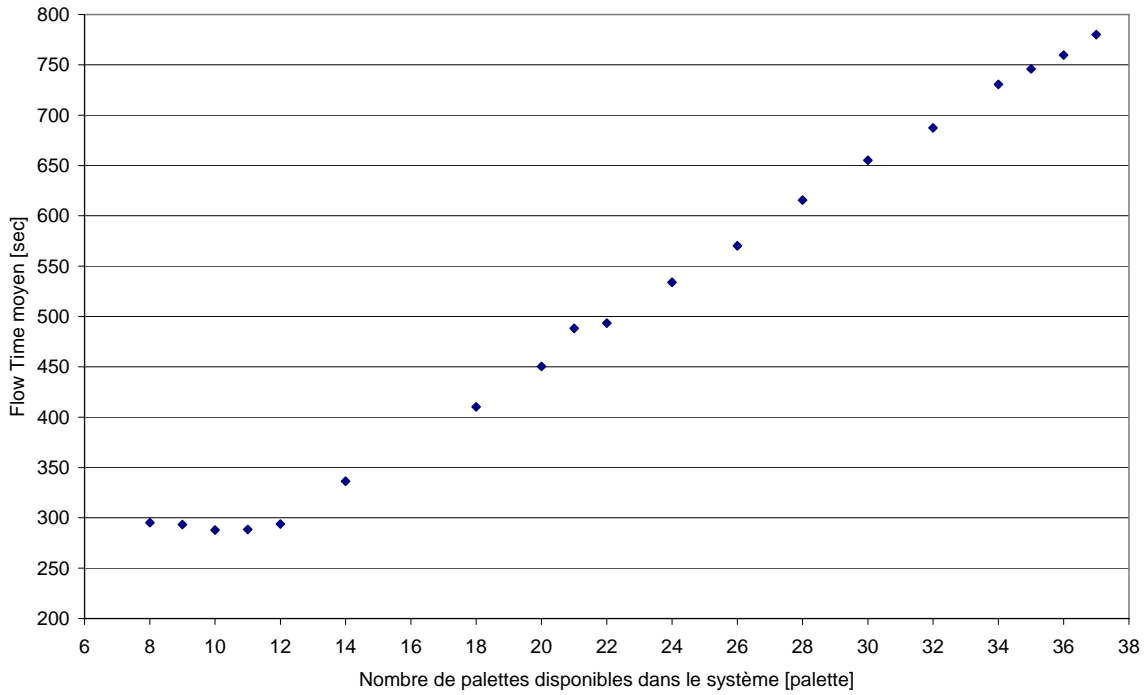


Figure 55. Relation entre le nombre de palettes et le  $C_{\max}$

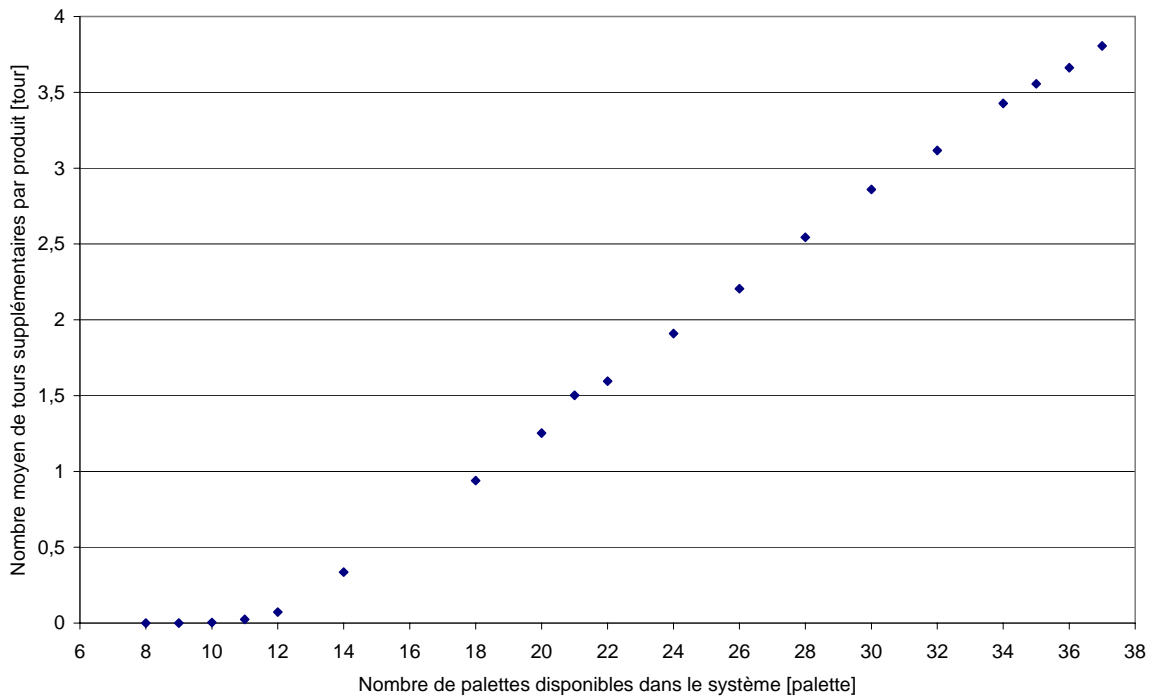
La courbe sur la Figure 55 nous permet de distinguer deux parties importantes : une première partie (zone A) où l'augmentation du nombre de palettes dans le système permet d'améliorer le  $C_{\max}$  jusqu'à un point (entre 12 et 14 palettes) où le système arrive à une certaine forme de saturation (zone B). La valeur de  $C_{\max}$  ne subit pas une diminution importante même avec l'augmentation du nombre de palettes. Ceci est lié au fait qu'une augmentation du nombre de palettes disponibles dans le système génère des phénomènes de saturation ou de surcharge pour certains convoyeurs du SFP.

Comme le montre la Figure 56, le Flow Time moyen est dans un premier temps (entre 8 et 12 palettes) stable en fonction de l'augmentation du nombre de palettes. Dans un second temps le Flow Time augmente très sensiblement avec le nombre de palettes supplémentaires.

Cette augmentation de la valeur du Flow Time peut s'expliquer par l'augmentation du nombre de tours supplémentaires faits par les palettes (Figure 57), les postes n'étant pas disponibles quand les palettes se présentent pour leur opération d'assemblage.



**Figure 56. Relation entre le nombre de palettes et le flow time moyen**



**Figure 57. Relation entre le nombre de palettes et le nombre moyen de tours supplémentaires faits par produit**

Les diagrammes fondamentaux du SFP sans le contrôle de vitesse sont représentés sur la Figure 58. Ils présentent des différences d'allure notable par rapport à ceux de la théorie du trafic (cf. Chapitre 2).



En effet, les phénomènes de saturation du SFP (densité élevée) ne conduisent pas pour autant le débit à une valeur proche de zéro. Le SFP continue à produire des pièces même lorsque la densité augmente.

On peut cependant s'apercevoir qu'à partir d'une fourchette comprise entre 12 et 20 palettes le débit maximum du système est atteint.

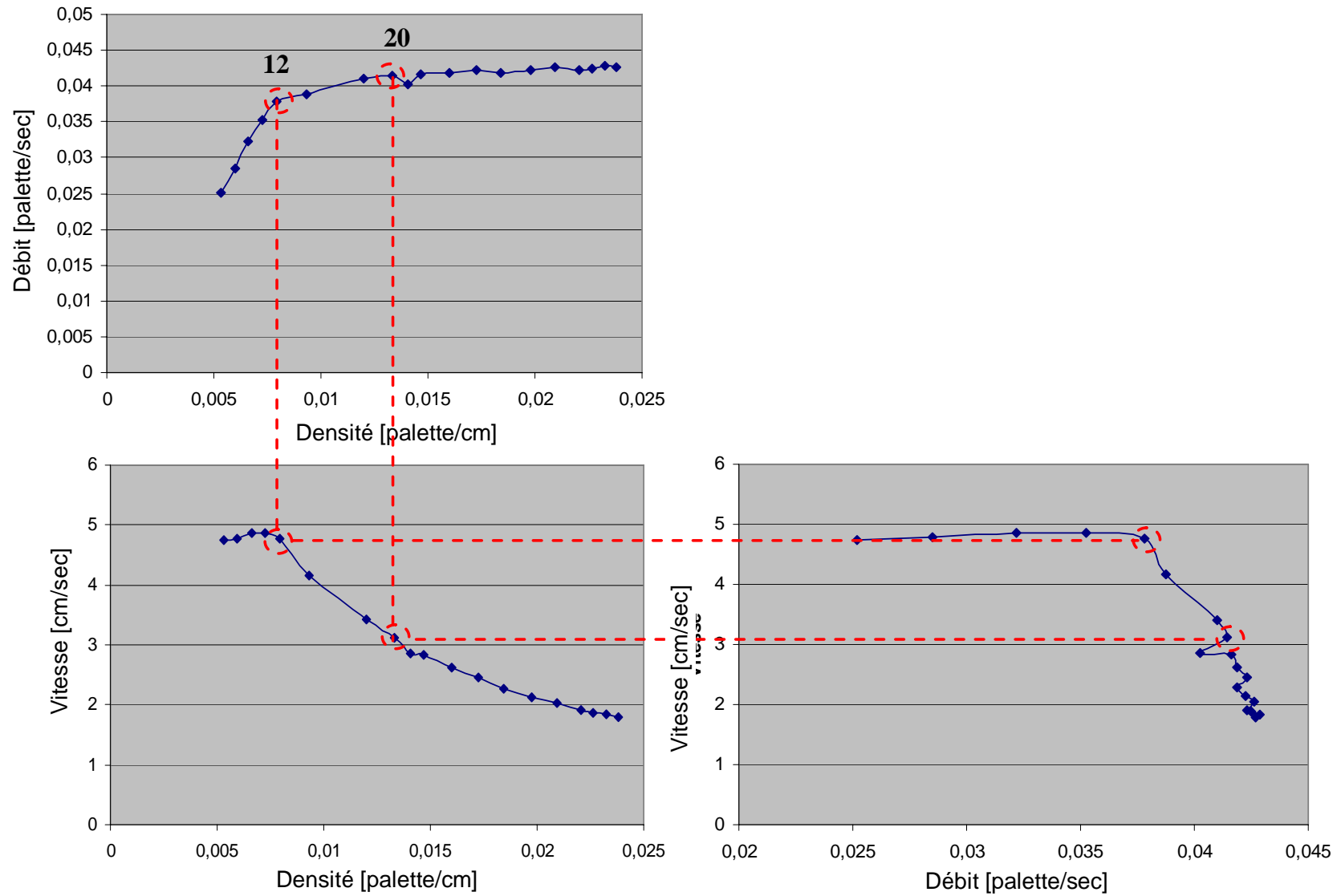


Figure 58. Diagrammes Fondamentaux (cas du SFP sans SCF)

Finalement l'étude de la relation entre le Flow Time moyen et le  $C_{\max}$  montre deux régimes distincts (Figure 59), la valeur numérique associée à chaque point représente le nombre de palettes dans le système :

- le régime 1 (entre 8 et 12 palettes) : dans ce régime le Flow Time est presque constant, et le  $C_{\max}$  subit une diminution importante de 33%.
- le régime 2 (entre 14 et 37 palettes) : dans ce régime le  $C_{\max}$  subit une légère diminution alors que le Flow Time subit une hausse importante en augmentant le nombre de palettes dans le système.

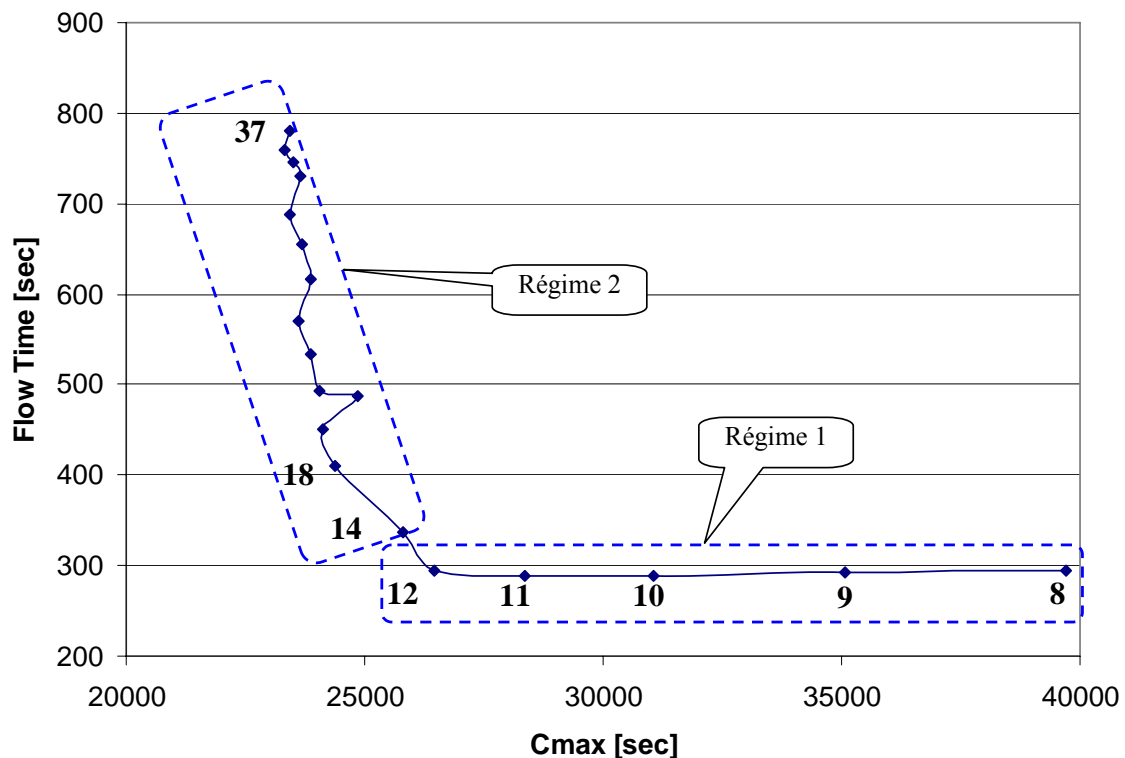


Figure 59. Relation entre le flow time moyen et le  $C_{\max}$

## 4.2 Avec le contrôle par le flux

Nous avons choisi d'appliquer le contrôle par le flux au SFP en contrôlant la vitesse de chaque convoyeur. Nous appliquons pour cela deux scénarios possibles de contrôle :

- contrôle "anticipatif" prenant en compte non seulement le nombre de palettes engagés sur le convoyeur contrôlé, mais également le nombre de palettes sur le convoyeur suivant.
- contrôle "local" qui, en fonction d'un seuil min et d'un seuil max de nombre de palettes sur le convoyeur contrôlé et du nombre réel de palettes s'y trouvant, déclenche une modification de vitesse du convoyeur ( $V_{\max}$  ou  $V_{\min}$ )

Le système est étudié avec des palettes en nombre différent (12, 16, 18, 20 et 21 palettes) et à différentes vitesses minimums de convoyeur. La vitesse minimum est fixée au début de la simulation. L'objectif est de trouver la politique et la vitesse minimum permettant d'améliorer le comportement du SFP tout en optimisant des paramètres tels que le flow time, et le Cmax.

#### 4.2.1 Contrôle anticipatif

La (Figure 60) représente de façon générique les 4 postes de travail du SFP. Nous l'utiliserons pour expliquer les conditions de changement de vitesse des convoyeurs.

Pour le cas de  $F_i$ , la condition de changement de vitesse du  $F_i$  est définie par l'algorithme suivant :

*Si le nombre de palettes  $c_{ci} \leq 4$  et  $c_{tox} \leq 2$*   
*Alors  $v_{ci} =$  vitesse min*  
*Sinon*  
 *$v_{ci} =$  vitesse nominale*  
*Fin Si*

Pour le cas de  $F_j$  la condition de changement de vitesse est :

*Si le nombre de palettes  $c_{cj} \leq 4$  et  $c_{ck} \leq 4$*   
*Alors  $v_{cj} =$  vitesse min*  
*Sinon*  
 *$v_{cj} =$  vitesse nominale*  
*Fin Si*

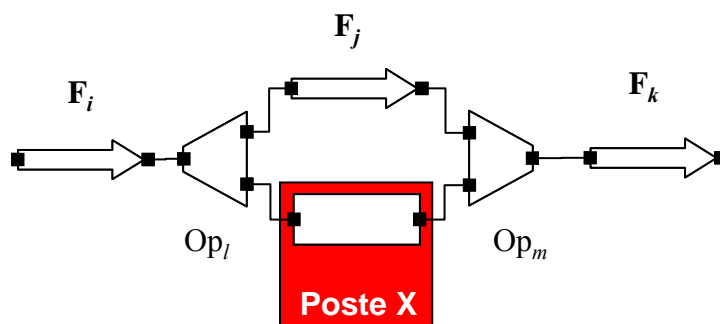


Figure 60. Exemple illustratif sur une partie du SFP

Ce sont alors les informations locales et celles remontées de l'aval qui déterminent les conditions de changement de vitesse du convoyeur.

La simulation est faite pour l'assemblage de 1000 produits. Afin de faciliter la lecture des résultats de simulation et les variables observées, nous avons choisi de les représenter sous format de courbes. Chaque point sur la courbe représente la valeur de variable observée pendant la simulation. La zone pointillée sur chaque figure représente le point de fonctionnement du système sans le contrôle de vitesse des convoyeurs.

Comme le montre la Figure 61, cette politique influence négativement le comportement du SFP en cas de petit nombre de palettes disponibles (cas 12 et 16 palettes). La diminution de la vitesse a provoqué une augmentation du flow time moyen.

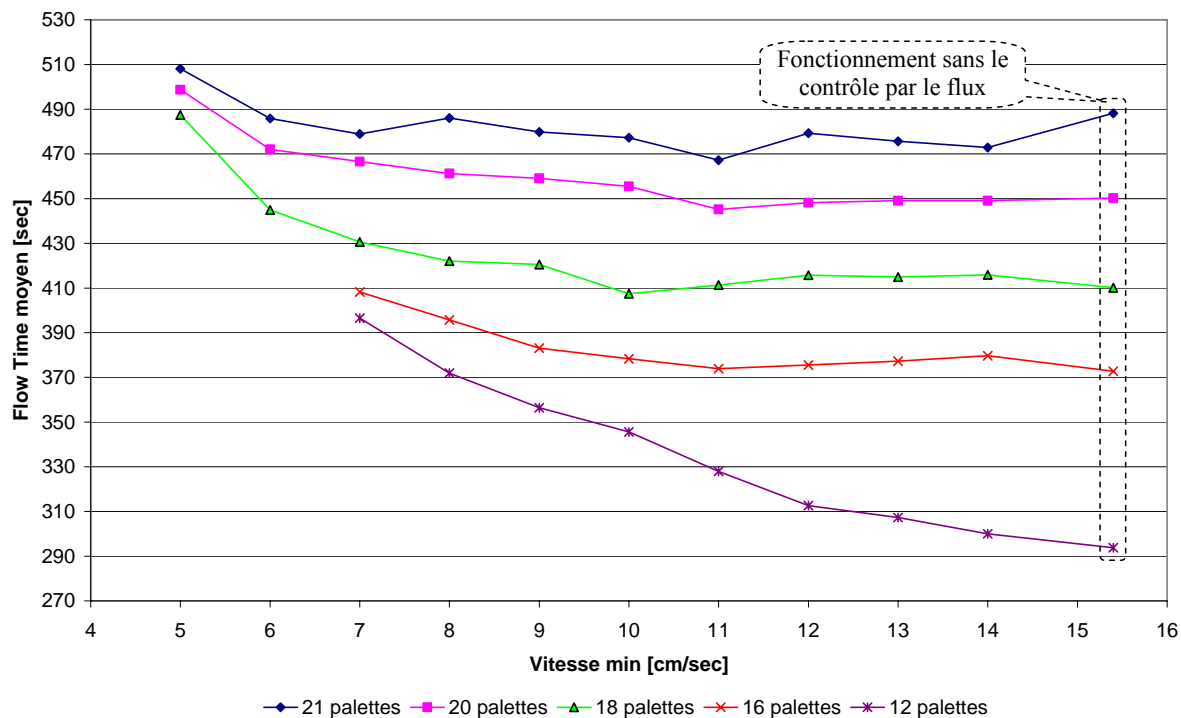


Figure 61. Relation Vitesse min – Flow Time, cas du contrôle anticipatif de la vitesse de convoyeur

D'un autre coté, cette politique influence positivement le comportement du SFP en cas de grand nombre de palettes disponibles (cas 18, 20 et 21 palettes) (Figure 61). Plus le nombre de palettes disponibles dans le système est important, plus le Flow Time moyen a tendance à diminuer. Le Tableau 9 montre un petit extrait des points de fonctionnement (nombre de palettes, vitesse minimale) les plus importants et le pourcentage d'évolution du Flow Time.

Nombre de palettes disponibles	Vitesse nominale Sans SCF	Vitesse variante avec SCF (minimale-nominale)		Pourcentage de diminution du Flow Time
	Flow Time [sec]	Vitesse min [cm/sec]	Flow Time [sec]	
18	410,14	10	407,39	0,67 %
20	450,26	11	445,22	1,12 %
21	488,16	11	467,21	4,29 %

Tableau 9. Comparaison de flow time sans et avec le contrôle par le flux (SCF)

Nous n'avons pas remarqué une amélioration importante pour le  $C_{max}$  en utilisant le contrôle par le flux. Une réduction de 2,36 % de  $C_{max}$  est remarquée pour le cas de 21 palettes avec une vitesse minimum de 11 cm/sec (Figure 62).

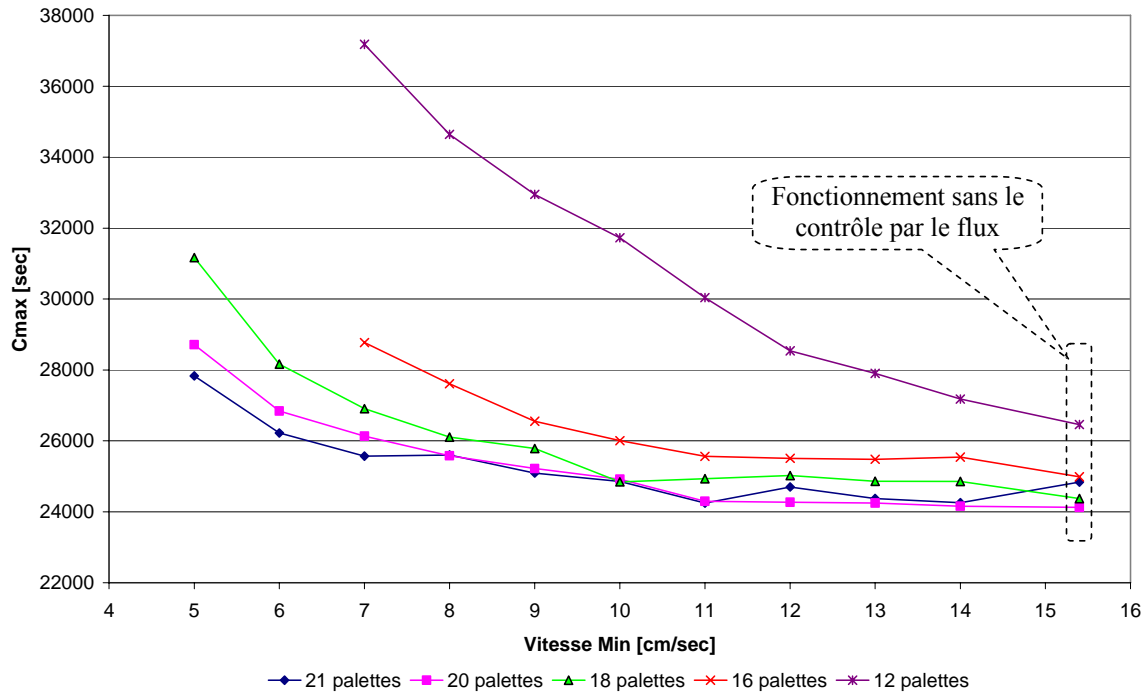


Figure 62. Relation Vitesse min –  $C_{max}$ , cas du contrôle anticipatif de la vitesse de convoyeur

L'application du contrôle par le flux en contrôlant la vitesse a permis d'un coté de diminuer le nombre moyen de tours supplémentaires faits par les palettes indépendamment de la vitesse minimum appliquée (Figure 63). En effet, en réduisant la vitesse de convoyeur, on a augmenté la possibilité d'assembler les pièces sur un des quatre postes sans être obligé de faire un tour supplémentaires. Ceci explique la diminution obtenue du Flow Time moyen (Figure 61).

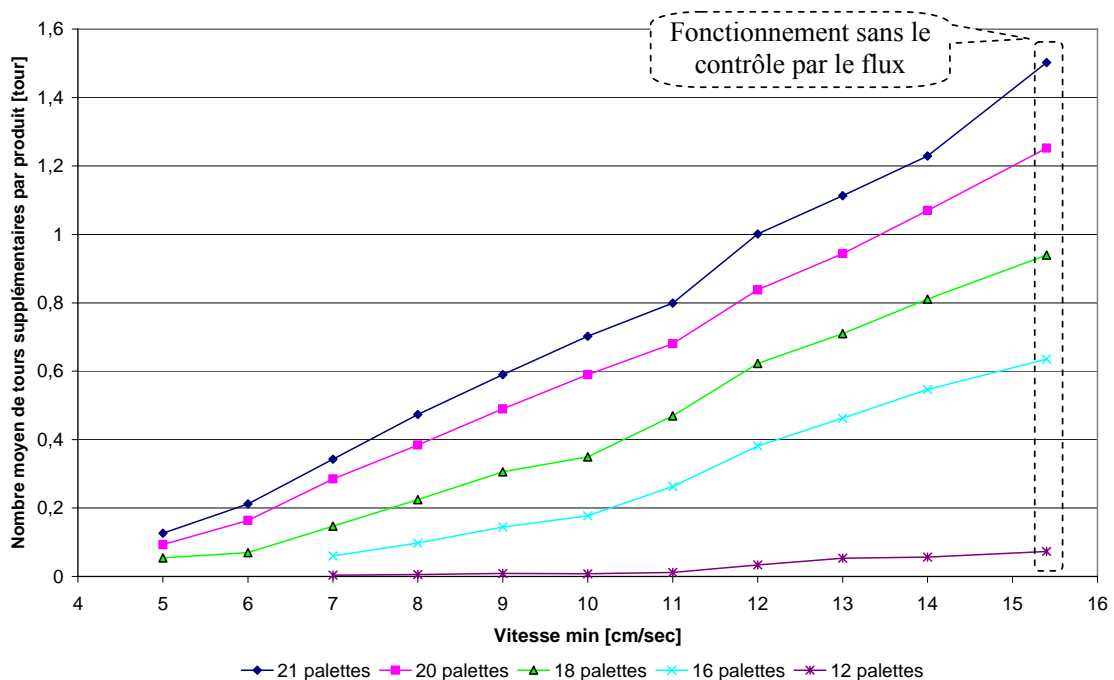


Figure 63. Le nombre moyen de tours supplémentaires par produit : cas du contrôle anticipatif

D'un autre coté, ce type de contrôle permet de minimiser, pour certaines vitesses, le Flow Time maximum, en particulier dans les cas où un grand nombre de palettes est disponible dans le système (Figure 64).

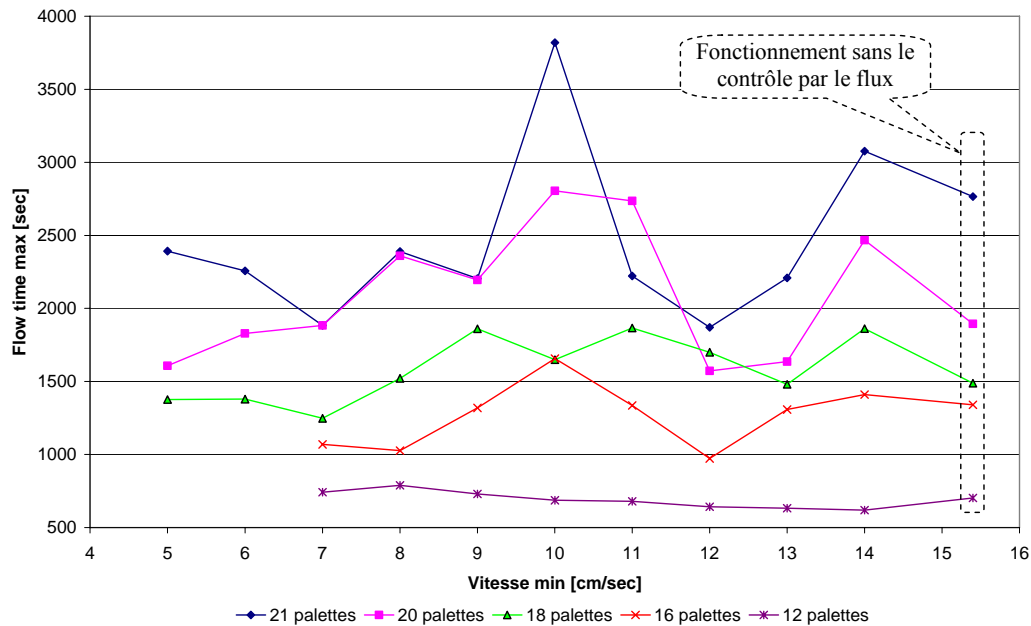


Figure 64. Le Flow Time max cas du contrôle anticipatif de la vitesse du convoyeur

## 4.2.2 Contrôle Local

Dans ce scénario de contrôle, la condition de changement de vitesse du convoyeur est définie en s'appuyant sur les informations locales sur l'état de convoyeur même. Nous étudions ici deux cas :

### 4.2.2.1 Cas des seuils Min/Max

Nous définissons ici, sur chaque convoyeur dans le SFP, deux seuils de nombre de palettes déterminant la condition de changement de sa vitesse :

- un seuil min déclenchera l'ordre de faire travailler le convoyeur à la vitesse minimum ;
- un seuil max déclenchera l'ordre de faire revenir le convoyeur à sa vitesse nominale (15,4 cm/sec dans le cas de SFP)

En utilisant le même exemple que dans le cas du contrôle anticipatif (Figure 60), nous définissons pour le cas de  $F_i$ , la condition de changement de sa vitesse par l'algorithme suivant :

*Si le nombre de palettes  $c_{ci} \leq \text{seuil min}$*

Alors  $v_{ci}$  = vitesse min

Sinon Si le nombre de palettes  $c_{ci}$  = seuil max

$v_{ci}$  = vitesse maximum

Fin si

Dans notre simulation nous avons défini :

- seuil min de nombre de palettes = 2 palettes ;
- seuil max de nombre de palettes = 4 palettes

Nous avons fait la simulation pour la même période de simulation, l'assemblage de 1000 produits finis. En étudiant les mêmes variables que celles observées précédemment dans le cas du contrôle anticipatif, les résultats de simulation montrent que l'amélioration la meilleure selon ce scénario est obtenue dans le cas à 21 palettes avec une vitesse minimum de 12 cm/sec. Le contrôle de vitesse a permis de diminuer le Flow Time de 2,82 % (Figure 65) et le  $C_{max}$  de 2,58 % (Figure 66).

Nombre de palettes disponibles	Vitesse nominale sans SCF	Vitesse variante avec SCF (minimale – nominale)		Pourcentage de diminution du Flow Time
	Flow Time [sec]	Vitesse min [cm/sec]	Flow Time [sec]	
16	372,73	14	371,74	0,26 %
18	410,14	14	407,15	0,73 %
20	450,26	13	449,29	0,21 %
21	488,16	12	474,36	2,82 %
22	493,37	9	487,88	1,11 %

Tableau 10. Tableau de comparaison des résultats sans et avec le contrôle par le flux, seuil min/max du nombre de palette sur le convoyeur

D'autres améliorations moins importantes sont obtenues comme par exemple le cas de 18 palettes avec une vitesse min de 14 cm/sec.



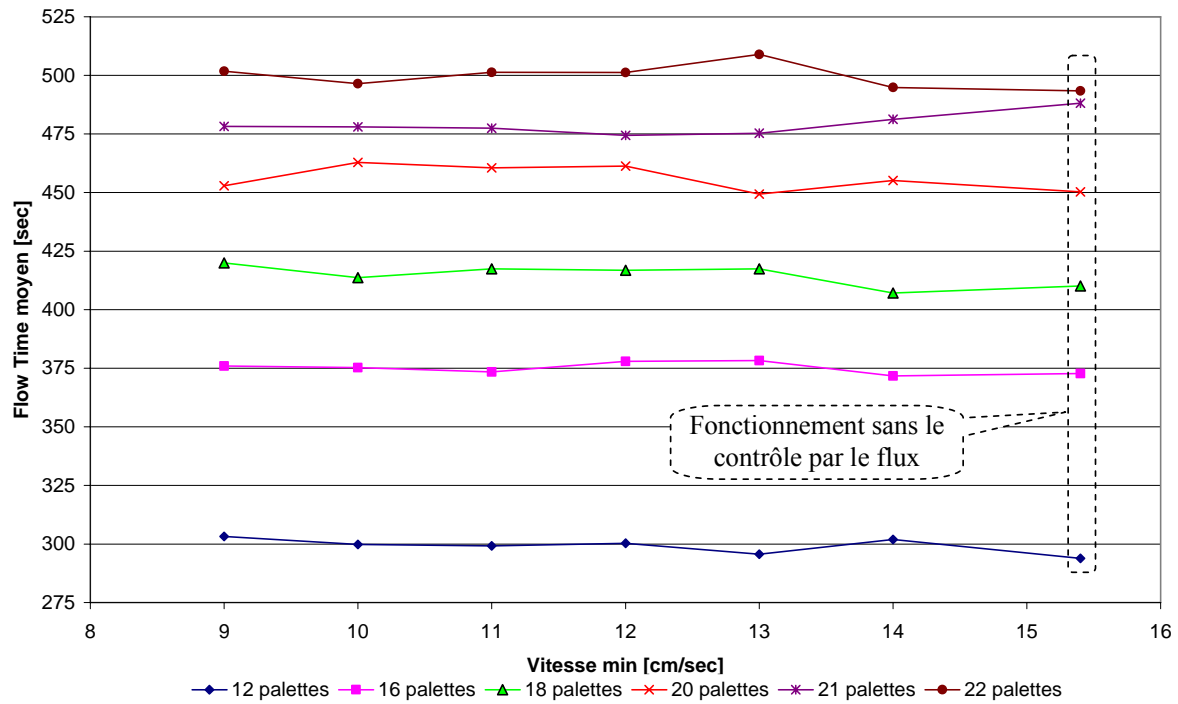


Figure 65. Flow Time moyen (cas des seuils Min/Max)

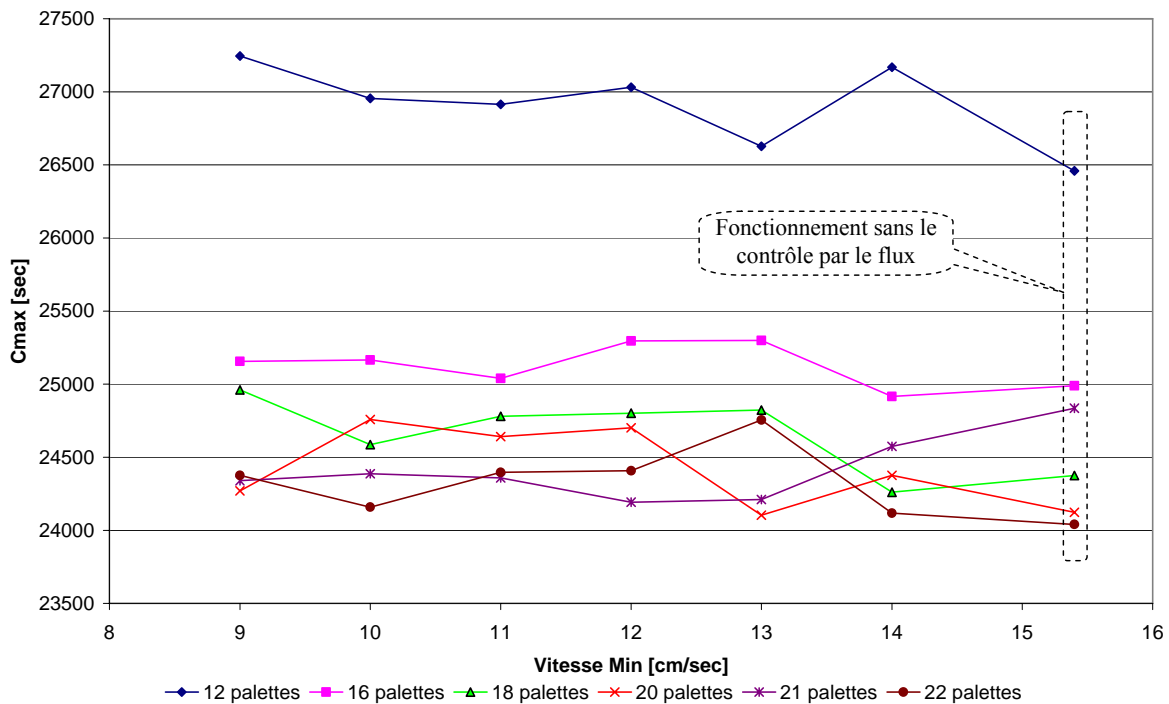


Figure 66.  $C_{max}$  (cas des seuils Min/Max)

Le contrôle de vitesse a également permis de diminuer le nombre moyen de tours supplémentaires faits par produit (Figure 67). Cela a eu pour conséquence de minimiser le Flow Time max pour certaines vitesses (Figure 68).

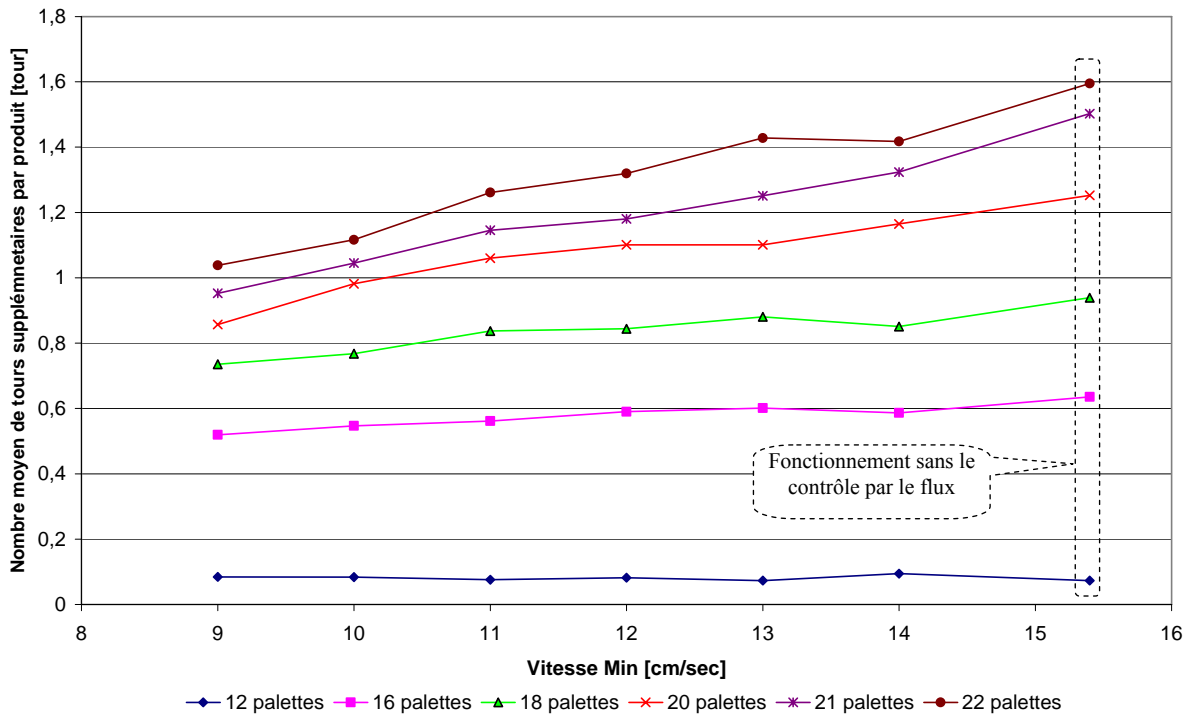


Figure 67. Le nombre moyen de tours supplémentaires par produit (cas des seuils Min/Max)

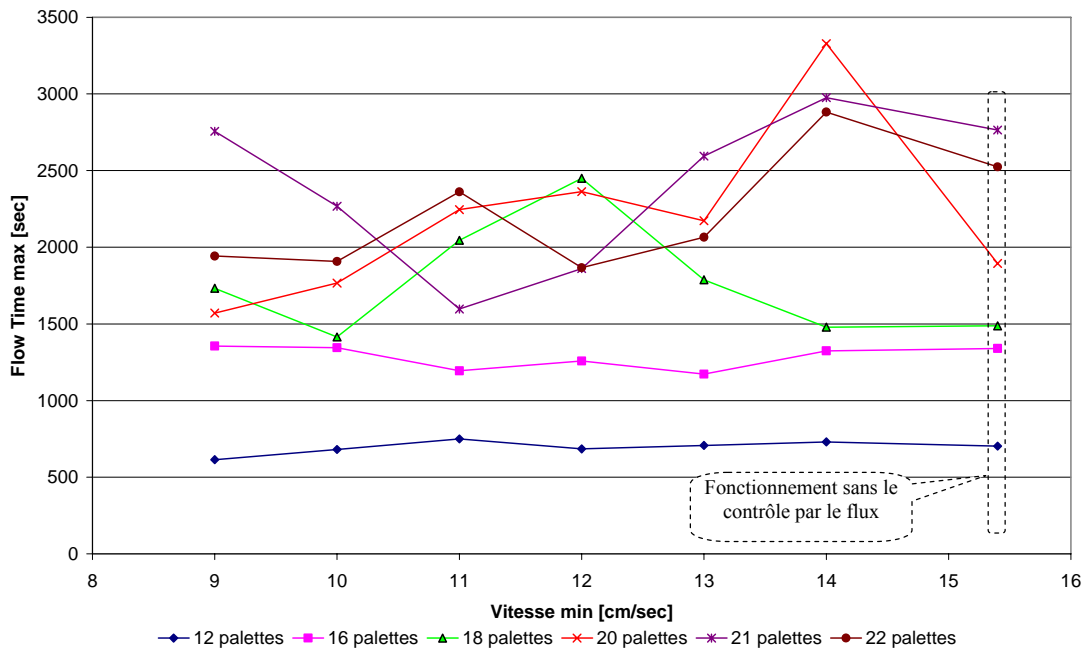


Figure 68. Le Flow Time max (cas des seuils Min/Max)

### 4.2.2.2 Notion de seuil Max

La condition de changement de vitesse est ici bornée à un seul seuil max de nombre de palettes sur le convoyeur. Ce seuil déclenchera l'ordre de ralentissement du convoyeur à sa vitesse min. La vitesse est maintenue tant que la condition est vraie.

Nous expliquons ce scénario en reprenant l'exemple de la Figure 60. Pour le cas de  $F_i$ , la condition de changement sa vitesse est définie par l'algorithme suivant :

*Si le nombre de palettes  $c_{ci} < \text{seuil max}$*   
*Alors  $v_{ci} = \text{vitesse min}$*   
*Sinon*  
 *$v_{ci} = \text{vitesse maximum}$*   
*Fin Si*

Dans la simulation nous avons choisi le seuil max  $c_{ci} = 3$  palettes.

Pour le même scénario de simulation, l'assemblage de 1000 produits finis, les résultats de simulation montrent que : la meilleure amélioration obtenue avec ce scénario l'est pour le cas à 21 palettes avec une vitesse min de 10 cm/sec (Tableau 11). Le contrôle de la vitesse a permis de diminuer le Flow Time de 4,36 % (Figure 69) et le  $C_{\max}$  de 3,99 % (Figure 70).

D'autres améliorations, moins importantes, sont obtenues comme par exemple le cas de 18 palettes avec une vitesse min de 14 cm/sec.

Nombre de palettes disponibles	Vitesse nominale sans SCF	Vitesse variante avec SCF (minimale – nominale)		Pourcentage de diminution du Flow Time
	Flow Time [sec]	Vitesse min [cm/sec]	Flow Time [sec]	
16	372,73	13	370,63	0,56 %
18	410,14	11	406,16	0,97 %
21	488,16	10	466,86	4,36 %
22	493,37	9	487,88	1,11 %

**Tableau 11. Tableau de comparaison des résultats sans et avec le contrôle par le flux, seuil max du nombre de palette sur le convoyeur**

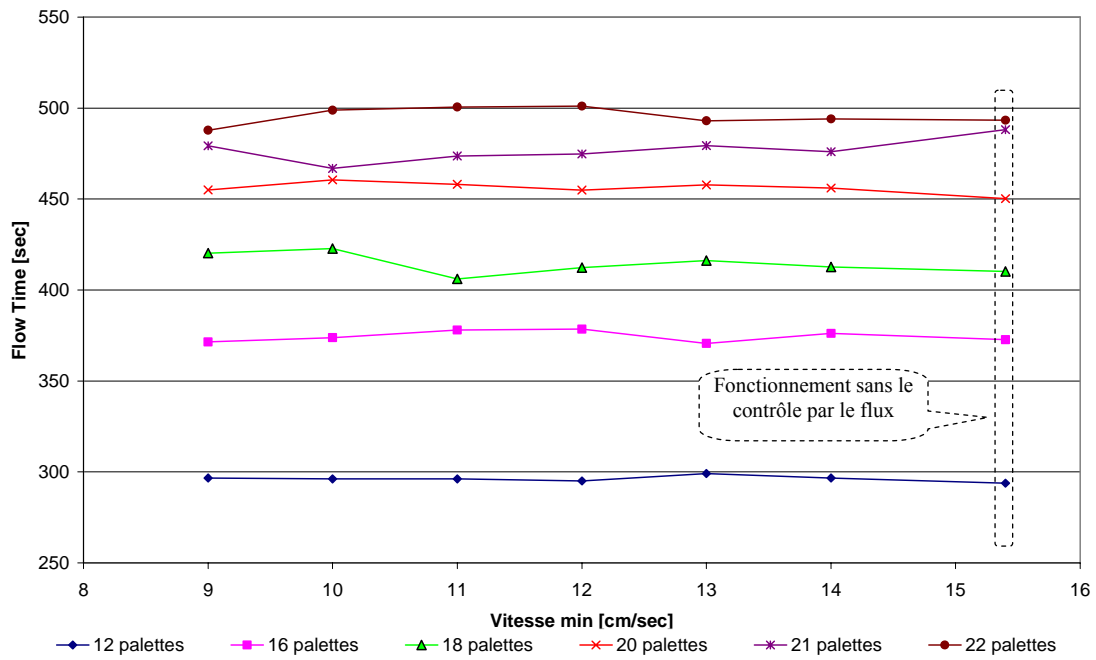


Figure 69. Flow Time, cas de seuil Max

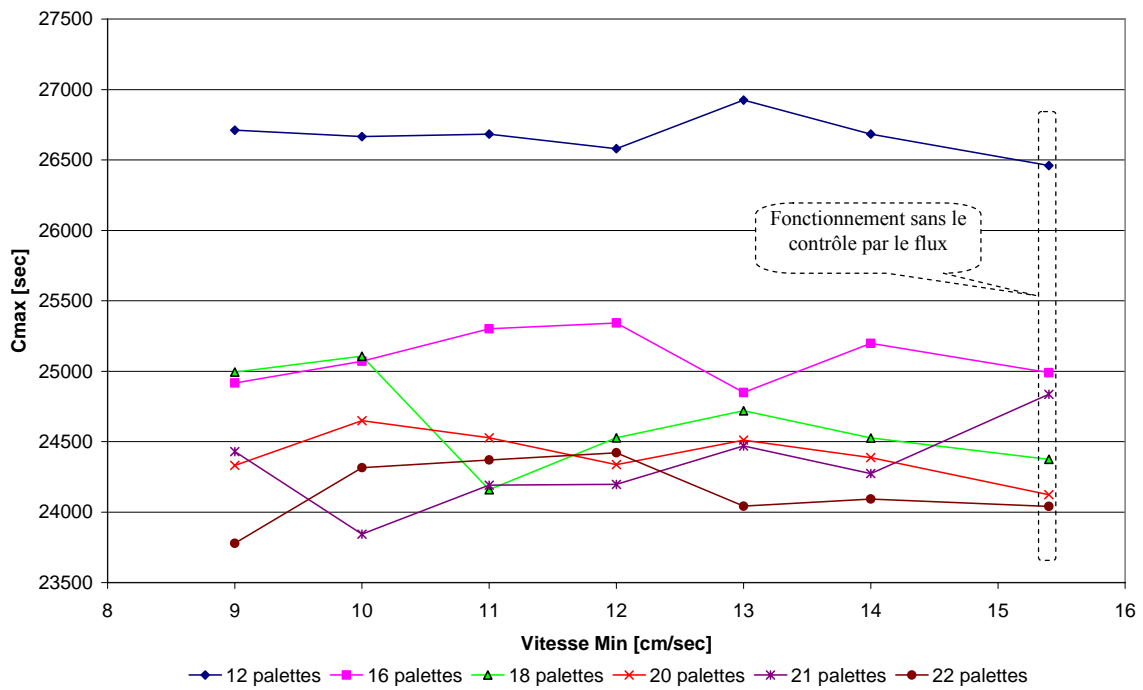


Figure 70. C<sub>max</sub>, cas de seuil Max

Selon cette politique le contrôle de vitesse a permis également de réduire légèrement le nombre moyen de tours supplémentaires par produit (Figure 71). Cela a permis de minimiser le Flow Time max (Figure 72).

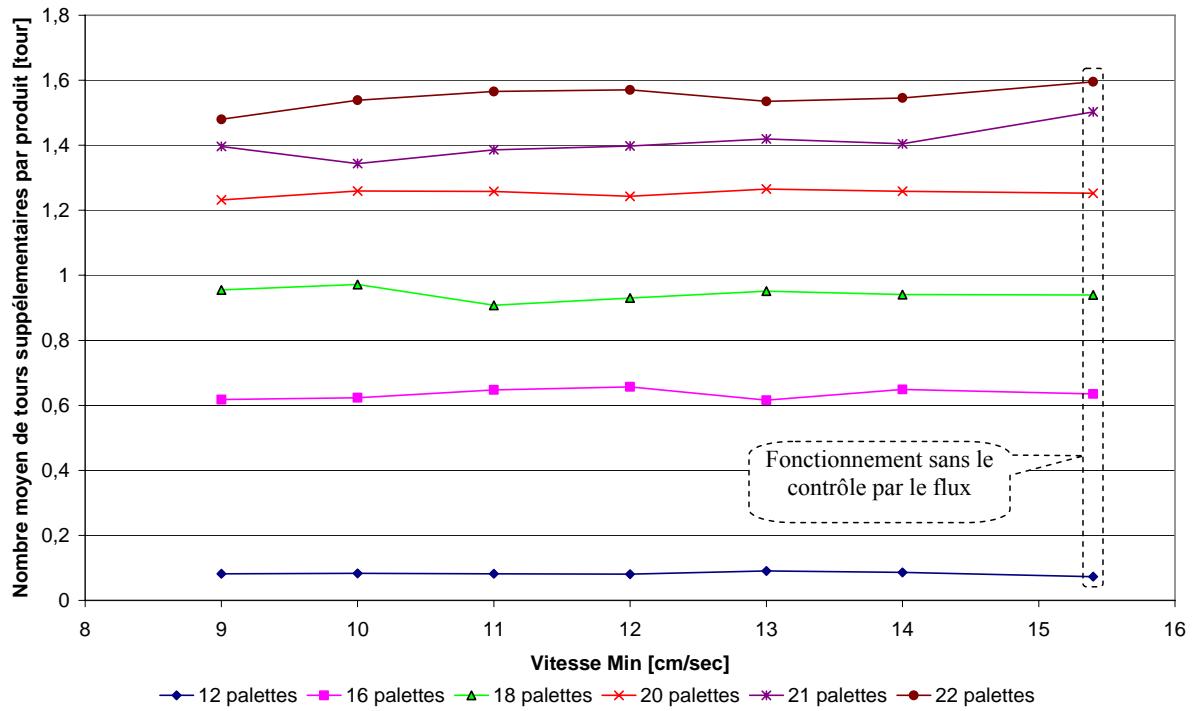


Figure 71. Évolution du nombre moyen de tours suppl. par produit, cas de seuil Max

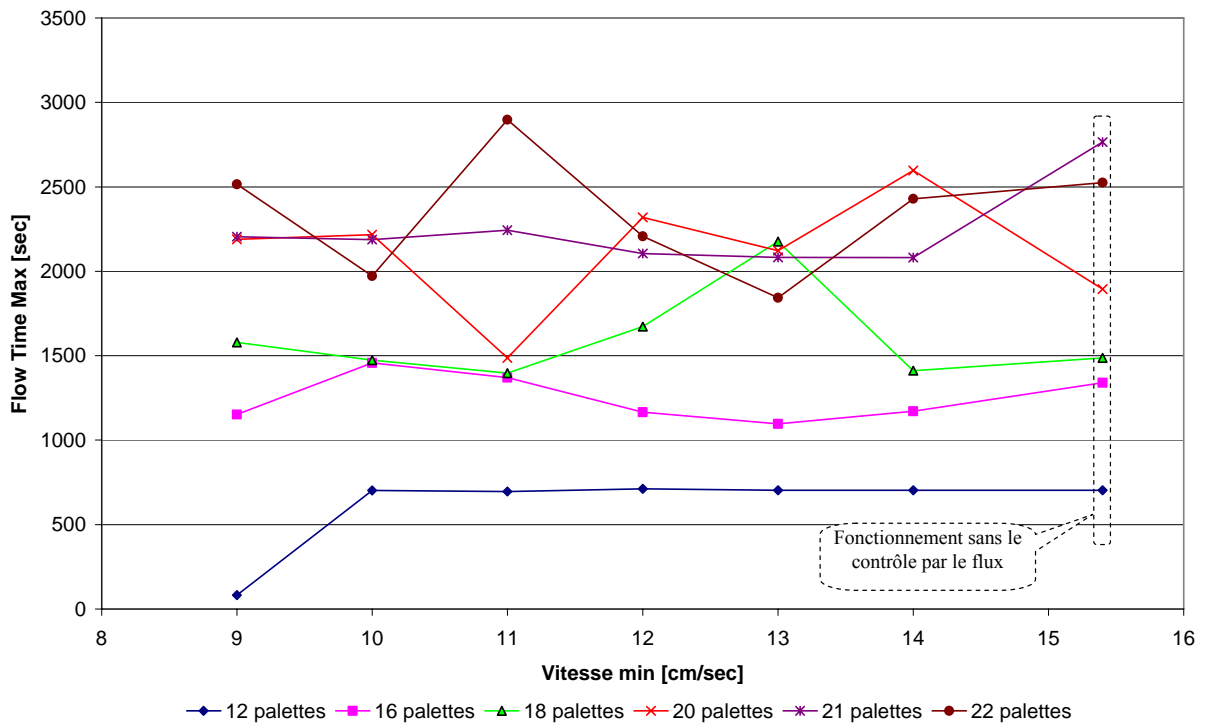


Figure 72. Flow Time Max, cas de seuil Max

## 5 Synthèse, critiques et Conclusion

L'approche de contrôle par le flux a donné des résultats intéressants. Elle a permis d'optimiser certains paramètres du SFP comme par exemple le Flow Time, le Flow Time max et le  $C_{max}$ . Le contrôle de vitesse du convoyeur a permis de réduire les valeurs de ces paramètres pour certaines vitesses, notamment quand le SFP fonctionne avec un grand nombre de palettes dans le système.

Dans cette approche les résultats des simulations favorisent l'utilisation de la politique de contrôle local puisqu'elle a permis de réduire la valeur du Flow Time de 4,36 % et le  $C_{max}$  de 3,99%.

L'observation du Flow Time max pour les trois scénarios étudiés montre la stabilité de ce paramètre dans le cas où le SFP fonctionne avec un petit nombre de palettes (12, 16 palettes) qui se traduit par une faible variabilité du Flow Time max (Figure 73). Cette variabilité augmente très sensiblement avec le nombre de palettes pour les deux scénarios de contrôle « anticipatif » et « local seuils min/max » contrairement au scénario de contrôle « local seuil max » où cette valeur reste aux alentours d'une moyenne de 50 000 sec.

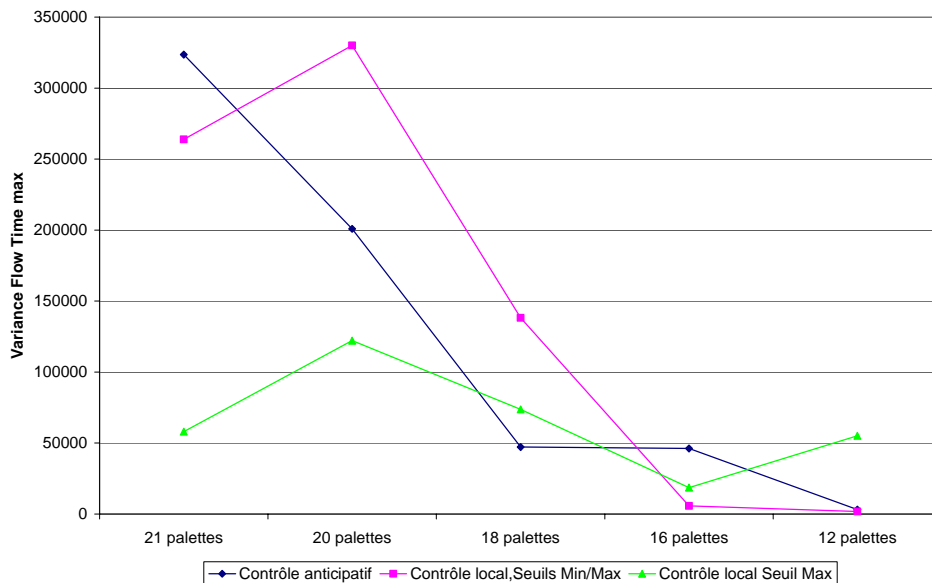


Figure 73. Variance Flow Time max pour les trois scénarios de contrôle par le flux

Ce chapitre nous a permis de valider le concept de contrôle par le flux. Cette validation ne couvre pas l'ensemble des propositions de la thèse, qui ont par ailleurs été individuellement et donc partiellement validées. Il est en effet délicat sur un seul et même exemple de valider l'ensemble des propositions de manière simultanée.



# **Conclusions Générales et Perspectives**





Cette thèse nous a permis d'aborder le thème de la maîtrise des flux physiques dans les systèmes manufacturiers (flux discrets d'objets hétérogènes). Ses travaux se veulent être une contribution à une problématique émergente depuis quelques années de la gestion des flux d'objets manufacturés dans un monde où la diversité des produits, le raccourcissement des délais, et la concurrence très forte rendent central cet aspect « écoulement » des produits du fournisseur du fournisseur au client final.

Nous avons donc présenté dans un premier temps quelques réflexions et premières analyses sur les flux en général. Deux éléments particuliers y ont été discutés, à savoir la nature et l'échelle d'observation des flux. Dans un second temps, deux approches pour le contrôle des flux ont été présentées : la première classique est celle du contrôle par les activités et la seconde, plus récente et faisant l'œuvre de travaux de recherche au CRAN, est celle du contrôle par le produit. Nous avons positionné l'approche proposée dans cette thèse par rapport aux deux approches précédentes. Notre proposition peut apparaître comme un complément des deux approches existantes.

L'étude bibliographique menée nous a permis d'exposer dans un premier temps des définitions courantes et les principes généraux utilisés pour l'étude des flux, puis deux approches particulières : l'approche énergétique et la théorie du trafic. En nous inspirant de la théorie du trafic, nous avons établi une liste de variables pouvant qualifier un flux à trois niveaux différents et considérés comme complémentaires (les produits dans le flux, les supports du flux et le flux lui-même). Les techniques d'agrégation et de modélisation-simulation des flux manufacturiers ont ensuite été présentées et analysées.

Sur les bases des analyses bibliographiques menées, des propositions de différents ordres ont été faites.

La première d'entre elles se concentre sur la définition de variables pouvant qualifier un flux hétérogène d'objets discrets. Nous avons à ce titre introduit des notions nouvelles permettant une qualification complémentaire à celle habituellement réalisées des flux manufacturiers ... les notions de rangs, de motifs et d'indice de fluidité.

La seconde est une adaptation du tétraèdre de Paynter aux flux manufacturiers où les quatre variables généralisées ainsi que leurs relations ont été proposées.

Ces deux premiers types de propositions nous ont servis de base à la proposition d'un modèle formel d'un flux manufacturier dans un formalisme NIAM. Enfin, un macro-modèle de simulation des flux manufacturiers, où les opérateurs d'objets du flux et du flux lui-même sont présentés, a également été proposé. Une symbolique graphique a été associée à chaque type d'opérateurs.

Ces propositions sont partiellement validées par simulation sur un modèle du SFP (Système Flexible de Production) de l'AIPL (Atelier Inter-établissements de Productique Lorrain).

Les travaux menés dans cette thèse peuvent apparaître comme une première base d'un thème de recherche qui reste encore à approfondir.

En effet, les résultats obtenus sont encourageants, tant au niveau de la modélisation de ces systèmes que de l'application du contrôle du flux.

En termes de perspectives, le développement d'une bibliothèque dédiée à la simulation de flux de produits pourrait être envisagée comme une suite logique à ces travaux. Cette

bibliothèque basée sur les opérateurs de flux proposés, pourrait faciliter la construction de modèles de flux d'objets dans les systèmes manufacturiers. Elle permettrait de séparer clairement les opérateurs d'objets du flux des opérateurs de flux, ces derniers étant à l'heure actuelle dans les outils existant incomplètement définis car confondus avec les premiers.

# Références Bibliographiques

- [Ait Hssain 00] Ait Hssain A., “*Optimisation des flux de production : méthodes et simulation*” Dunod, L’usine Nouvelle 2000, ISBN 2100057669, 2000
- [Aldanondo 92] Aldanondo M., “*Modélisation des données pour la planification et l’ordonnancement de la production : mécanismes d’agrégation et désagrégation*”, Thèse de l’INSA, Toulouse, 1992
- [Alkassem et Charpentier 04] Alkassem K., Charpentier P., “*Contribution to Manufacturing Flow System Analysis and Physical Modelling*”, EuroSim’04, 5th EUROSIM Congress on Modelling and simulation, September 06-10, 2004
- [Amrah 98] Amrah A., “*Contribution à l’analyse et à la commande des systèmes à événement discrets par une approche continue : Application aux systèmes de production modélisés par réseaux de Petri Continus*”, Thèse de Doctorat, université de Franche-Comté, 1998
- [Awasthi 04] Awasthi A., Awasthi A., “*Développement d’un système de routage hiérarchique pour les réseaux urbains*”, Thèse de Doctorat, Université de Metz, 2004
- [Axsäter 81] Axsäter S., “*Aggregation of product data for hierarchical production planning*”, operational Research, vol. 29, n°4, p. 744-756, 1981
- [Baglin et al. 05] Baglin G., O. Bruel, A. Garreau, M. Greif, L. Kerbache, C. Van Delft, “*Management Industriel et logistique. Conception et pilotage de la supply chain*”, Editeur Economica, ISBN : 2-7178-5017-1, 2005
- [Baina et al. 06] Baina S., Panetto H., Benali K., “*A product oriented modelling concept : Holons for systems synchronisation and interoperability*”, ICEIS’06, 8th International Conference on Enterprise Information Systems, Paphos, Cyprus, 2006.
- [Bando et al. 95] Bando M., Hasebe K., Nakayama A., Shibata A., Sugiyama Y., “*Dynamical Model of Traffic Congestion and Numerical Simulation*”. Phys. Rev. E 51, (1995) 1035-1042
- [Bertrand et Kieffer dans Pujo et Kieffer 02] Pujo P., Kieffer J.P., “*Méthodes du pilotage des systèmes de production*”, Hermès Science Publication, ISBN 2-7462-0514-9, Paris, 2002
- [Besombes et al. 97] Besombes B., Marcon E., Long J., “*A modular approach for modelling of manufacturing system with bond Graph. Single part type systems*”. IFAC, Belfort, France, 1997
- [Besombes et Marcon 93] Besombes B., Marcon E., “*Bond-graphs for modelling of manufacturing systems*”, IEEE International Conference on Systems, Man and Cybernetics, vol. 3, 256-261, Le touquet, France, 1993
- [Biteau 03] Biteau R., Biteau S., “*La maîtrise des flux industriels*”, Edition d’Organisation, ISBN: 2-7081-2960-0, 2003.
- [Blazewicz et al. 00] Blazewicz J., Pawlak G., Espinouse M.-L., Finke G., “*Scheduling tasks and vehicles in a flexible manufacturing system*”, International Journal of Flexible Manufacturing Systems, Volume 4, Number 1 FMSs-network flow model», Operations Research Proceedings 1999, Springer, 2000, p.399-352.

- [Bongaerts et al. 00] Bongaerts L., Monostori L., Mcfarlane D., Kadar B., “*Hierarchy in distributed shop floor control*”, Computers in Industry, 43, pp. 123-137, 2000
- [Borutzky 99] Borutzky W., “*Bond graph modeling from an object oriented modeling point of view*”, Simulation Practice and Theory 7 (1999) 439-461
- [Boskma 82] Boskma K., “*Aggregation and the design of models for medium-term planning of production*”, European Journal of operational Research, 10, p. 244-249, 1982
- [Bourrel et Henn 02] Bourrel E., Henn V., “*Mixing micro and macro representations of traffic flow: a first theoretical step*”, in: Proc. 9th meeting of the Euro Working Group on Transportation, (Polytechnic of Bari, Italy, 2002) pp. 610-616
- [Bourrières 98] Bourrières J.P., “*Multilevel algebraic modelling of complex manufacturing tasks*”, IMS’98, Porto Algere, 1998
- [Braesch et Haurat 95] Braesch C., Haurat A., “*La modélisation systémique en entreprise*”, édition Hermès, Paris, 1995
- [Bruniaux 00] Bruniaux R. “*Simulation continue de réseaux de sites industriels : Application aux chaînes logistique dans le secteur Automobile*” Thèse de Doctorat, Institut Français de Mécanique Avancée, Université Blaise Pascal, Clermont II, 2000
- [Bruniaux et al. 00] Bruniaux R., Caux C., Pierreval H., “*An aggregation procedure for continuous simulation of production units organised in network*”, in Proc. IFAC conference Management and Control of Production and Logistics, Grenoble, France, 2000
- [Burlat et al. 01] Burlat P., Campagne J.P., “*Performance industrielle et gestion des flux*”, Hermès, Paris, 2001
- [Campagne et al. 01] Campagne J.P., Burlat P., “*Maîtrise et Organisation des flux Industriels*” Hermès, LAVOISIER, ISBN 2-7462-0296-4, 2001
- [Charpentier 02] Charpentier P., “*Contribution au pilotage des flux physiques dans les industries manufacturiers*”. Habilitation à diriger des Recherches, Université Henri Poincaré – Nancy 1, 2002.
- [Chowdhury et al. 00] Chowdhury D., Santen L., Schadschneider A., “*Statistical physics of traffic and some related systems*”, Physics Reports, Volume 329, issues 4-6, pp. 199-329, 2000
- [Christensen et al. 96] Christensen J., Thouati M., Odo S., “*Les systèmes holoniques*”, CiMax, Edition Terrain, N° 7, pp. 26-31, 1996
- [Danjou 99] Danjou F., “*Analyse théorique des décyclages sur ligne de production et indicateur de performances, stocks de sécurité de composants optionnels, sur ligne de production perturbées*”. Cahier de recherches 1999-08 (a), 1999-14 (b), IAE Paris GREGOR, 1999
- [David et al. 98] David R., Alla H., “*Du grafctet au réseaux de Petri*”, Editions Hermès, Paris, 1998
- [Deen 03] Deen S.M. (Editeur), “*Agent-Based Manufacturing - Advances in the Holonic Approach*”, Springer ISBN 3-540-44069-0, 2003
- [Dembélé 93] Dembélé S., “*Contribution à la modélisation qualitative des flux dans l’usine Manufacturière*” Thèse de Doctorat, U.F.R. Des sciences et des Techniques, Université de Franche-Comté, 1993

- [Dembélé et Lhote 93] Dembélé S., Lohte F., “Analyse et représentation par bond graphs des fonctions d’écoulement de flux de produits manufacturés”, APII, vol.29, n°1, (1993).105-123
- [Duffie et Prabhu 96] Duffie N.A., Prabhu V., “Heterarchical control of highly distributed manufacturing systems”, international Journal of Computer Integrated Manufacturing, vol. 9, n°4, 1996, pp. 270- 281
- [Dupont 00] Dupont L., “Gestion Industrielle”, Hermès, 2000
- [Erschler et Grabot 01] Erschler J., Grabot B., “Organisation et gestion de la production”, Edition Hermès, 2001
- [Féliot 97] Féliot C. “Modélisation de système complexes : intégration et formalisation de modèles” Thèse de doctorat, Laboratoire d’Automatique et d’Informatique de Lille, Université de Lille I, 1997
- [Filliger 05] Filliger R., “From car traffic to production flow: a guided tour through solvable stochastic transport processes” Thèse de doctorat, école Polytechnique Fédérale de Lausanne, EPFL, STI Faculté des sciences et technique de l’ingénieur, 2005
- [Filliger et Hongler 05] Filliger R., Hongler M.-O., “Cooperative flow dynamics in production lines with buffer level dependent production rates”. EJOR, 167:116–128, 2005
- [Fontan et al dans Burlat et Campagne 01] Fontan G., Mercé C., Erschler J., “La planification des flux de production”, Cité dans Burlat et campagne 01
- [Fontana75] Paveri-Fontana S.L., “On Boltzmann-like Treatments for Traffic Flow. A Critical Review of the Basic Model and an alternative Proposal for Dilute Traffic Analysis”. Transportation Research 9, (1975) 225-235
- [Forrester 61] Forrester J.W., “Industrial Dynamics”, Cambridge, MA.: M.I.T Press, 1961
- [Gazis et al. 61] D.C. Gazis, Herman, R. & Rothery R.W. “Nonlinear Follow the Leader Models of traffic flow”. Operations Research 9, (1961) 545-567
- [Gouyon 04] Gouyon D., “Contrôle par le produit des systèmes d’exécution de la production: apport des techniques de synthèse”, Thèse de doctorat, université Henri Poincaré, Nancy I, 2004
- [Gouyon et al. 04] Gouyon D., Jean-Marcelo S., Alkassam K., Morel G., “Product-Driven Automation Issues For B2m-Control Systems Integration”. INCOM’04, IFAC, International Conference on Information Control Problems, Salvador da Bahia, Brazil, Avril 4-7 2004
- [Greenshields 35] Greenshields B.D., “A study of traffic capacity. Proceedings of the Highway” Research Board, 14:448–477, 1935
- [Helbing 96] Helbing D., “Gas-Kinetic Derivation of Navier-Stokes-Like Traffic Equations”. Phys. Rev. E 53, (1996) 2366-2381
- [Helbing 98] Helbing D., “From microscopic to macroscopic traffic models”. 122-139 in: J. Parisi, S.C. Müller, and W. Zimmzemann (eds.) A perspective Look at Nonlinear Media. From physic to biology and Social Sciences, Springer, Berlin, 1998
- [Helbing 01] Helbing D., “Traffic and related self-driven many- particle systems”, Review of Modern Physics, Volume 73, Octobre 2001.

- [Helbing 03] Helbing D., “*Modelling supply networks and business cycles as unstable transport phenomena*”. *New Journal of Physics*, 5:90.1–90.28, 2003
- [Helbing 04] Helbing D., “*Production, Supply, and Traffic Systems: A Unified Description*”, arXiv:cond-mat/0401469 v1, juin 04, <http://arxiv.org/abs/cond-mat/0401469>
- [Hétreux et al. 96] Hétreux G., Fontan G., Mercé C., “*Multi level planning: Robustness with production backlogs*”, *Computational Engineering in Systems applications, CESA’96*, Lille, 1996
- [HMS 94] HMS Requirements, <http://hms.ifw.uni-hannover.de/>: HMS Server.
- [Hongler et Filliger 02] Hongler M.-O., Filliger R., “*Mesosopic derivation of a fundamental diagram of one-lane traffic*”. *Physics Letters A*, 301: 597–602, 2002
- [Hssain 00] Hssain A.A., “*Optimisation des flux de production : méthodes et simulation*” Dunod, L’usine Nouvelle 2000, ISBN 2100057669, 2000
- [Iordanova et al. 04] Iordanova V., Abouaïssa H., Nikolov E., Jolly D., “*Modélisation Macroscopique du trafic : Approche Volumique*”. *Conférence Internationale Francophone d’Automatique, CIFA’04*, DOUZ, Tunisie, 22-24 novembre 2004
- [Iordanova et al. 06] Iordanova V., Abouaïssa H., Jolly D., “*Sur la dynamique du flux de trafic : Moèdele macroscopique volumique*”, 6<sup>ème</sup> *Conférence Froncophone de Modélisation et simulation – MOSIM’06*, Rabat-Maroc, 2006
- [ITE 76] Institut of Transportation Engineering, <http://www.ite.org/>
- [Kerner et Konhäuser 94] Kerner B.S., Konhäuser P., “*Structure and Parameters of Clusters in Traffic Flow*”. *Phys. Rev. E* 50, (1994) 54-83
- [Kumar et Kleine 83] Kumar R., Kleine O., “*System dynamics Model of Material Flow – case of a Steel Plant*”, *proceedings of the International System Dynamics Conference*, Pine Manor College, Chestnut Hill, Massachussets, 1983
- [Lair 00] Lair P.O., “*Contribution à la modélisation, à l’analyse et à la commande des systèmes de production par une approche Bond-Graphs*”, *Thèse de doctorat*, Université de Franche-Comté, 2000
- [Lair et al 96] Lair P.O., Zerhouni N., Ferney M., “*Using bond graphs to model production systems*”, in *Proc. 5th Rensselaer’s International Conference, CIMAT’96*, *Computer Integrated Manufacturing and Automation Technology*, (INPG Grenoble, France, 1996) 19-23
- [Le Moigne 77] Le Moigne J. J. “*La Théorie du système général, théorie de la modélisation*”, Puf, Paris, 1977
- [Le Moigne 90] Le Moigne J.J. “*La Modélisation des Systèmes Complexes*” Afcet Systems, Edition Dunod, 1990
- [Lebas 91] Lebas M. “*Comptabilité analytique basée sur les activités, analyse et gestion des activités*”, *Revue française de comptabilité*, n°226, p. 47-63 septembre 1991
- [Lhoste 95] Lhoste P., “*Contribution au génie automatique : concepts, modèles, méthodes et outils*”. *Habilitation à diriger des Recherches*, Université Henri Poincaré – Nancy 1, 1995

- [Liu et Carthy 96] Liu J., Mac Carthy B., “*The classification of FMS scheduling problems*”, International Journal of Production Research, vol. 34, n 3, 1996, p. 647-656
- [Lorino 91] Lorion P., “*Le contrôle de gestion stratégique : la gestion par les activités*”, Paris, Dunod, 1991
- [Matthews 95] Matthews J., “Organisational foundations of intelligent manufacturing systems – The holonic viewpoint”, Computer Integrated Manufacturing Systems, Vol. 8, N° 8, pp. 237-243, 1995
- [May et Keller 67] May A.D., & Jr., Keller H.E.M, “*Non-Integer Car Following Models*”. Highway Research Record 199, (1967) 19-32
- [Mayer 95] Mayer F., “*Contribution au génie productique: Application à l’ingénierie Pédagogique en Atelier Inter-établissements de Production Lorraine*”. Thèse de Doctorat, CRAN, University Henri Poincaré, Nancy I, 1995.
- [McFarlane 03] Mcfarlane D., “*Product identity and its impact on discrete event observability*”, ECC’03, European Control Conference, University of Cambridge, UK, 1-4 septembre 2003
- [Medjoudj et al. 04] Medjoudj M., Khalfaoui S., Demmou H., Valette R., “*Un algorithme pour l’extraction des scénarios critiques dans les système hybrides*”, journée « Formalisation des Activités Concurrentes » (FAC’ 2004), Toulouse - France, 2004
- [Meinadier 98] Meinadier J.P. “*Ingénierie et intégration des systèmes*”, ISBN :2-86601-720-X, Edition HERMES, Paris P. 113-114, 1998
- [Mevellec 90] Mevellec P., “*Outils de gestion – la pertinence retrouvée*”, Editions Comptables Maleshebes, Paris, 1990
- [Morel et al. 03] Morel G., Panetto H., Zaremba M.B., Mayer F., “*Manufacturing Enterprise control and management system engineering : paradigms and open issues*”, IFAC Annual Reviews in control. 27/2, 199-209, 2003
- [Muhl 02] Muhl E., “*Contribution à la vision globale du flux véhicule : vers un outil d’aide à la décision – application pour grand constructeur automobile*”, Thèse de doctorat, Nancy 2002
- [Öuali et al. 97] Öuali M.S., El Mahmedi A., Binder Z., “*La Modélisation des Systèmes de production Intégrant les Concepts Structures, Activités et de Flux*”; Deuxième Congrès International Franco – Québécois de Génie Industriel, Septembre – ALBI, France, 1997
- [Özdamar et Yazgac 99] Özdamar L., Yazgac T., “*A hierarchical planning approach for a production distribution system*”; International Journal of Production Research. vol. 37, n° 16, p. 3759-3772, 1999
- [Payne 71] Payne H.J., “Models for Freeway Traffic and control. Mathematical Models of public systems” (ed. G.A. Bekey) 1, 51-61, 1971
- [Paynter 61] Paynter H.M., “*Analysis and Design of Engineering Systems*”, MIT, Cambridge, MA, 1961
- [Penalva 94] Penalva J.M., “*Sagace, la modélisation des systèmes dont la maîtrise est complexe*”, Second International Conference on Integrated Logistic and Concurrent Engineering, ILCE’04, p.261 à 270,1994



- [Saidane et al. 03] Saidane B., Manier H., El moudni A., “*Similitude d’un réseau de transport urbain et un système flexible de production (SFP)*”, 4<sup>ème</sup> Conférence Francophone de Modélisation et Simulation MOSIM’03, « Organisation et conduite d’activités dans l’industrie et les services », Toulouse, France, 2003
- [Valckenaers et al. 98] Valckenaers P., Van Brussel H., Wyns J., Bongaerts L., Peeters P., “*Designing of holonic manufacturing systems*”, Robotics and Computer-Integrated Manufacturing, 14, pp. 455-464, 1998
- [Tanguy 00] Tanguy G.D., “*Les Bond Graphs*” Hermès Sciences Publications, ISBN 2-7462-0158-5, Paris 2000
- [Yoshikawa dans Deen 03] Deen S.M. (Editeur), “*Agent-Based Manufacturing - Advances in the Holonic Approach*”, Springer ISBN 3-540-44069-0, 2003
- [Zolghadri 98] Zolghadri M., “*Contribution à la modélisation agrégée des systèmes de production discrète*”, Thèse de doctorat de l’université Bordeaux I, 1998
- [Zolghadri et Bourrières 98] Zolghadri M., Bourrières J. P., “*A data aggregation Framework for multi-level production system control*”, IEEE IMS’98, San Diego, 1998

# **Annexes**



## Annexe 1. Rappel sur le formalisme NIAM/ORM

La méthode NIAM (Nijssen Information Analysis Method) [Nijssen 81]<sup>17</sup>, généralisée plus tard à « Natural language Information Analysis Method », repose sur le modèle relationnel binaire initialement défini par [Abrial 74]<sup>18</sup> et une méthode d'analyse basée sur le langage naturel. Par l'introduction de nouveaux concepts et contraintes, cette méthode enrichit le modèle entité/association.

### Description de la méthode de modélisation

Dans cette méthode, le langage naturel joue un rôle prépondérant. En effet, cette méthode d'analyse est basée sur l'expression d'un problème à l'aide de phrases simples, c'est-à-dire indécomposables sans perte d'information. De telles phrases, appelées « idées » ; relient deux concepts. Un même concept est identifié par une valeur qui constitue son nom. Enfin, des contraintes de différents types seront apposées à ces concepts.

### Concepts

Les concepts manipulés par NIAM sont de deux natures différentes :

- les concepts, ou choses, représentent les objets du monde réel, et sont appelés NOLOTs (NON Lexical Object Types) ;
- les noms associés à ces concepts, appelés LOTs (Lexical Object Types), sont représentés par des valeurs simples (chaîne de caractères, entiers, ...).

Les concepts (NOLOTs) sont associés entre eux par des relations binaires qui représentent les idées, chaque relation binaire étant caractérisée par deux rôles (relation bilatérale) selon le point de vue du concept par rapport auquel on se place. Les relations entre NOLOTs et LOTs sont appelées des ponts de dénomination.

### Représentation d'un NOLOT :



### Représentation d'un LOT :

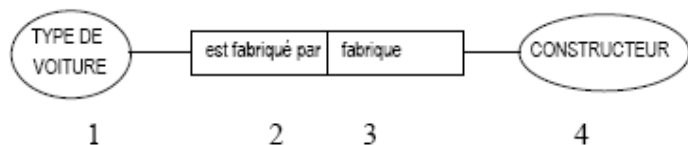


### Représentation d'une « Idée » :

Les idées mettent en relation deux NOLOTs, soit l'Idée suivante :

<sup>17</sup> [Nijssen 81] G.M. Nijssen "An architecture for knowledge base systems", Proc. SPOT-2 conf., Stockholm, 1981

<sup>18</sup> [Abrial 74] J.R. Abrial – Data Semantics in Data Management Systems, Kimbie & Koffeman (ed.), North Holland



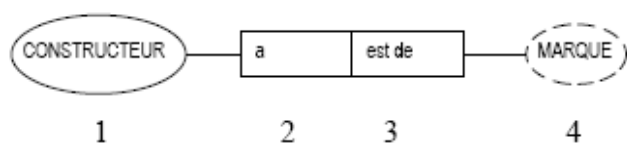
Elle peut se lire au choix :

1-2-4 (un) TYPE DE VOITURE est fait par (un) CONSTRUCTEUR ou

4-3-1 (un) CONSTRUCTEUR fait (un) TYPE DE VOITURE

### Représentation d'un « Pont de dénomination » :

Les ponts de dénomination mettent en relation un NOLOT et un LOT, soit le pont de dénomination suivant :



Il se peut lire au choix :

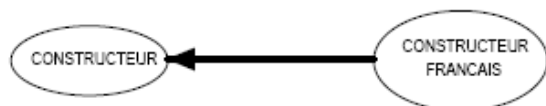
1-2-4 (un) CONSTRUCTEUR a (une) MARQUE ou

4-3-1 (une) MARQUE est de (un) CONSTRUCTEUR

Remarque : Dans ces deux exemples, 2 et 3 sont appelés des ROLES

### Représentation de sous types :

Un CONSTRUCTEUR FRANÇAIS est une sorte de CONSTRUCTEUR



### Contraintes

NIAM permet d'exprimer des contraintes de totalité et des contraintes d'unicité sur les rôles définis dans les idées. NIAM permet également d'exprimer des contraintes ensemblistes telle, par exemple, l'union d'ensembles. Enfin, NIAM permet de définir des relations d'héritage entre NOLOTS. Cela permet d'exprimer dans ce formalisme les relations de généralisation, Spécialisation.

## Représentation des contraintes :

Contraintes	Signification	Représentation	Commentaire
Unicité sur rôle	Au plus un		A joue r1 <b>au plus une fois</b> B joue r2 <b>n fois</b>
			A joue r1 <b>au plus une fois</b> B joue r2 <b>au plus une fois</b>
			A joue r1 <b>n fois</b> B joue r2 <b>n fois</b>
Unicité entre rôles	Une combinaison de rôle permet de définir un objet		Une Date est <b>définie de façon unique</b> par la combinaison d'un Jour, d'un Mois et d'une Année
Totalité	Chaque, tout		<b>Chaque</b> A joue r1
Totalité entre rôles	Au moins un		<b>Tout</b> A joue <b>au moins</b> r1 ou r2.
Totalité sur classes			<b>Tout</b> élément de A doit être B et/ou C
Exclusion entre rôles	Si l'un pas l'autre		A joue r1 <b>ou (exclusif)</b> r2.
Exclusion entre classes			Un élément de A ne peut pas appartenir à B et à C
Sous-ensemble	Un si l'autre		<b>Si</b> A joue r2 <b>alors</b> il joue r1.
Egalité	Les deux		A joue r1 <b>et</b> r2, ou aucun des deux



## Annexe 2. Verbalisation du modèle de flux

*Product in Flow is an entity object type.*

*Product in Flow is an alias for the nested fact type 'Flow contains Product'*

*Rank\_in is a value object type.*

*Rank\_out is a value object type.*

*Flow (Id\_F) is an entity object type.*

*Every Flow is identified by one distinct Id\_F.*

*Product in Flow has Rank\_in / Rank\_in is of Product in Flow*

*Each Product in Flow has some Rank\_in.*

*Each Product in Flow has at most one Rank\_in.*

*Each Rank\_in is of at most one Product in Flow.*

*Product in Flow has Rank\_out / Rank\_out is of Product in Flow*

*Each Product in Flow has some Rank\_out.*

*Each Product in Flow has at most one Rank\_out.*

*Each Rank\_out is of at most one Product in Flow.*

*Velocity is a value object type*

*Product in Flow has Velocity / Velocity is of Product in Flow*

*Each Product in Flow has some Velocity.*

*Each Product in Flow has at most one Velocity.*

*Space Headway is a value object type*

*Product in Flow has Space Headway / Space Headway is of Product in Flow*

*Each Product in Flow has some Space Headway.*

*Each Product in Flow has at most one Space Headway.*

*Time Headway is a value object type*

*Product in Flow has Time Headway / Time Headway is of Product in Flow*

*Each Product in Flow has some Time Headway.*

*Each Product in Flow has at most one Time Headway.*

*Product (Id) is an entity object type.*

*Every Product is identified by one distinct Id.*

*Product is independent (An instance does not have to play any other roles).*

*Source (Id\_SO) is an entity object type.*

*Every Source is identified by one distinct Id\_SO.*

*Source is independent (An instance does not have to play any other roles).*

*Sink (Id\_SI) is an entity object type.*

*Every Sink is identified by one distinct Id\_SI.*

*Sink is independent (An instance does not have to play any other roles).*

*Sink has Flow / Flow is of Sink*

*Each Flow is of some Sink.*

*Each Flow is of at most one Sink.*

*Source has Flow / Flow is of Source*

*Each Flow is of some Source.*

*Each Flow is of at most one Source.*



*For each Sink x and Source y*  
*There is at most one Flow that*  
*Sink x has some Flow*  
*Source y has some Flow.*  
*Flow is primarily identified by the above combination.*

*Flow contains Product / Product belongs to Flow*  
*Each Flow contains some Product.*  
*\*It is possible that some Flow contains more than one Product and that some Product belongs to more than one Flow.*  
*This fact is nested as 'Product in Flow'.*

*Order Relationship is an entity object type.*  
*Order Relationship is an alias for the nested fact type 'Product in Flow precedes Product in Flow'*  
*Order Relationship is independent (An instance does not have to play any other roles).*

*Product in Flow precedes Product in Flow / Product in Flow follow Product in Flow*  
*\*It is possible that some Product in Flow precedes more than one Product in Flow and that some Product in Flow follow more than one Product in Flow.*  
*A Product in Flow cannot cycle back to itself through one or more applications of this relationship.*  
*This fact is nested as 'Order Relationship'.*

*Motif is composed of Order Relationship / Order Relationship form Motif*  
*Each Motif is composed of some Order Relationship.*  
*It is possible that some Motif is composed of more than one Order Relationship and that some Order Relationship form more than one Motif.*

*Motif (Id) is an entity object type.*  
*Every Motif is identified by one distinct Id.*

*Flow has Density / Density is of Flow*  
*Each Flow has some Density.*  
*Each Flow has at most one Density.*

*Density is a value object type.*

*Flow has Debit / Debit is of Flow*  
*Each Flow has some Debit.*  
*Each Flow has at most one Debit.*

*Debit is a value object type.*

*Flow has Velocity / Velocity is of Flow*  
*Each Flow has some Velocity.*  
*Each Flow has at most one Velocity.*  
*Velocity is a value object type.*

*Flow precedes Flow / Flow follows Flow*  
*It is possible that some Flow precedes more than one Flow and that some Flow follow more than one Flow.*  
*A Flow cannot cycle back to itself through one or more applications of this relationship.*

*Flow belongs to Flow / Flow contains Flow*  
*It is possible that some Flow belongs to more than one Flow and that some Flow contains more than one Flow.*

### Annexe 3. Présentation de la structure des systèmes d'information mis en place à AIPL

L'AIP dispose également de différents types d'outils d'ingénierie : CAO, FAO, Ingénierie d'Automatisation ... Il est considéré dans notre étude comme une entreprise de production à part entière. Il est organisé autour des systèmes d'informations et de contrôle/commande à tous les niveaux de sa structure (Figure 74) :

- Entreprise Ressource Planning : l'ERP mis en place est Adonix X3
- Manufacturing Execution System : le MES mis en place est FlexNet ; l'AIP dispose également d'un outil d'ordonnancement (Incoplan) et d'un outil de GMAO (Empacix)
- La supervision est assurée par Wonderware InTouch sur le SFP
- Le contrôle/commande est assuré par des commandes numériques NUM, des automates programmables Siemens programmés à l'aide de l'atelier Step7.

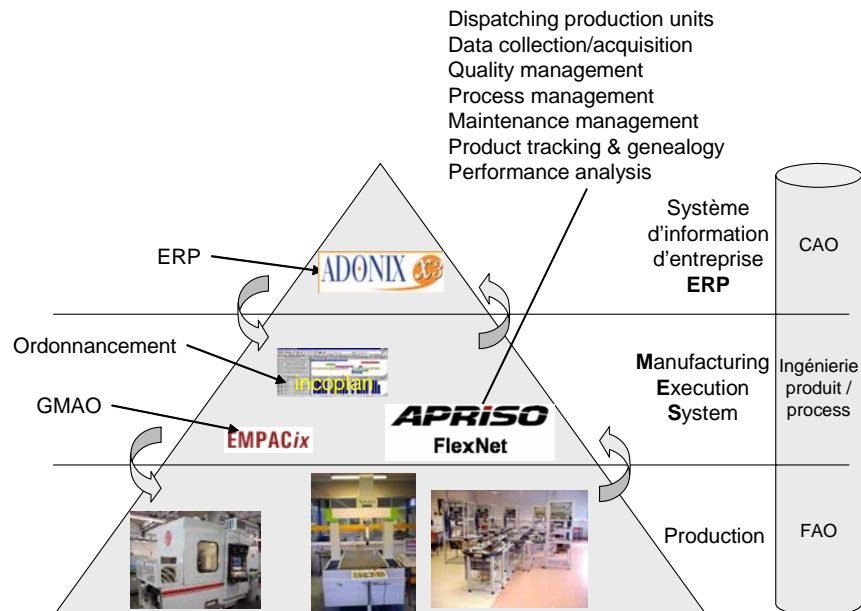


Figure 74. Structure des systèmes d'information mise en place à l'AIP



## Annexe 4. Acquisition de données dans le SFP

Les données sont acquises par les lecteurs d'étiquettes devant le poste de travail et à l'entrée de l'aiguillage. Les étiquettes, placées sur les palettes, supportent les gammes d'assemblage des produits. Des informations de fabrication sont ajoutées à chaque opération faite sur un poste. Le poste de contrôle ajoute son diagnostic et assure l'identification unique du produit.

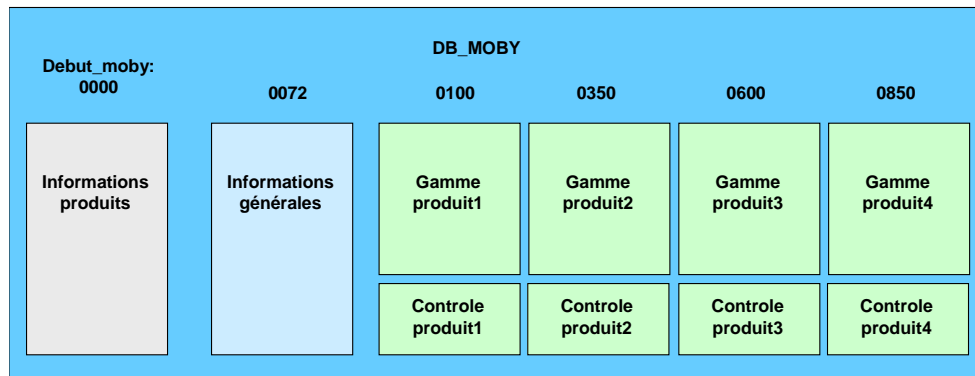


Figure 75. Mémoire électronique de 8 K Octets

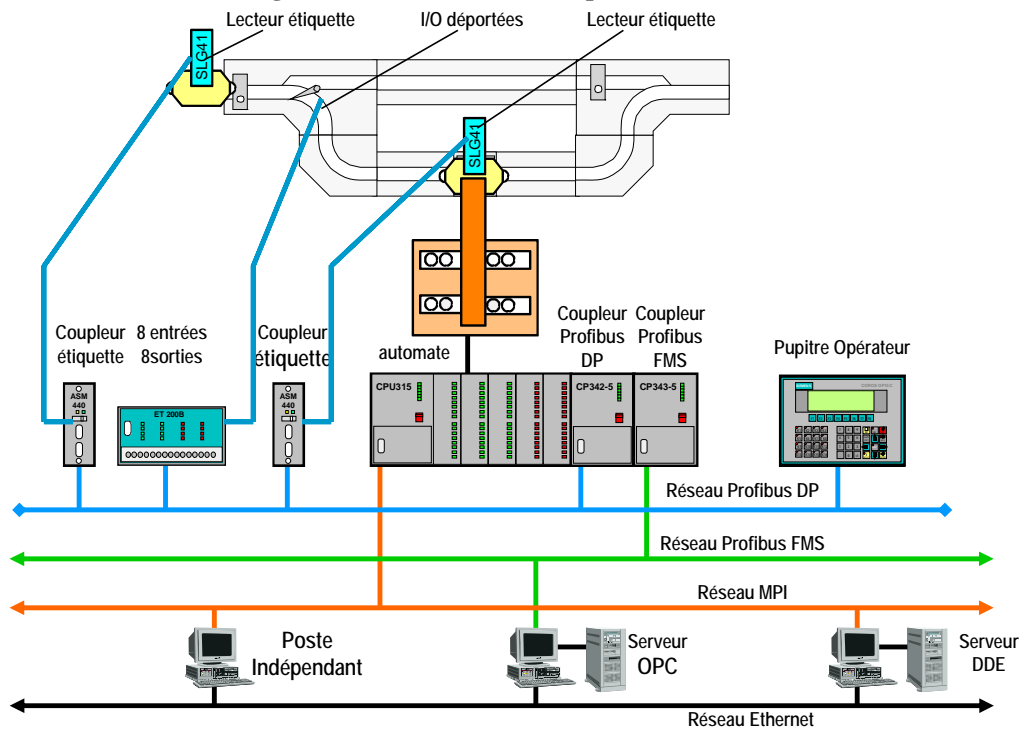


Figure 76. Acquisition de données du SFP



## Annexe 5. Bibliothèque dédiée à la modélisation du flux sous ARENA®

L'objectif visé de cette bibliothèque est de réduire la complexité de la modélisation de flux physique dans les systèmes manufacturiers.

Présentation des modules de la Template Flow (Figure 77)

**Module Source** : génère les produits (entités) qui circulent dans le flux. On définit ici la loi d'arrivée de ces entités et des informations sur les produits (type, dimension, ..).

**Module sink** : module permettant de faire sortir les produits (entité) du modèle de simulation.

**Module Assembly** : composé d'un ensemble des blocs qui permettent de réaliser une opération d'assemblage au niveau de produits du flux.

**Module disassembly** : composé d'un ensemble des blocs qui permettent de réaliser une opération de désassemblage au niveau de produit du flux.

**Module simple circulation** : module permet de circuler les produits (entités) entre une source, une opération et un puits. Les caractéristiques du support sont définies. Ce module permet de définir quelques paramètres et variables de flux de produits.

**Module object transformation** : module permet de modéliser et simuler les différents processus de transformation simple faites au niveau de produits de flux.

**Module Convergence** : module permet de modéliser et simuler une opération d'assemblage faite au niveau de flux

**Module Disassembly** : module permet de modéliser et simuler une opération de désassemblage faite au niveau de flux

**Module flow Transformation** : module permet d'effectuer une opération de transformation au niveau de flux

**Module composite circulation** : module permet d'effectuer une opération au niveau de produits du flux et au flux même.

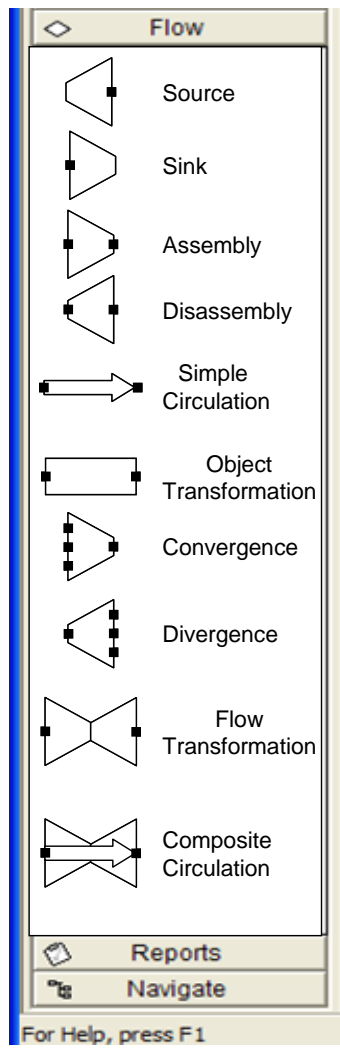


Figure 77. Bibliothèque Flow

**Titre**

« Evaluation et Pilotage des flux manufacturiers : réflexions et propositions »

**Résumé**

Cette thèse aborde le thème de la maîtrise des flux physiques dans les systèmes manufacturiers (flux discrets d'objets hétérogènes). Ses travaux se veulent être une contribution à une problématique émergente depuis quelques années de la gestion des flux d'objets manufacturés dans un monde où la diversité des produits, le raccourcissement des délais, et la concurrence très forte rendent central cet aspect « écoulement » des produits du fournisseur du fournisseur au client final. Le mémoire présente dans un premier temps quelques réflexions et premières analyses sur les flux en général. Deux éléments particuliers y sont discutés, à savoir la nature et l'échelle d'observation des flux. Dans un second temps, deux approches pour le contrôle des flux sont présentées : la première classique est celle du contrôle par les activités et la seconde, plus récente et faisant l'œuvre de travaux de recherche au CRAN, est celle du contrôle par le produit. L'approche proposée dans cette thèse est ensuite positionnée par rapport aux deux approches précédentes.

La partie bibliographique du mémoire expose dans un premier temps des définitions courantes et les principes généraux utilisés pour l'étude des flux, puis deux approches particulières : l'approche énergétique et la théorie du trafic. En s'inspirant de la théorie du trafic, une liste de variables pouvant qualifier un flux à trois niveaux différents et considérés comme complémentaires (les produits dans le flux, les supports du flux et le flux lui-même) est ensuite établie. Les techniques d'agrégation et de modélisation-simulation des flux manufacturiers sont ensuite présentées et analysées.

Sur les bases des analyses bibliographiques menées, des propositions de différents ordres sont ensuite faites. La première d'entre elles se concentre sur la définition de variables ou concepts pouvant qualifier un flux hétérogènes d'objets discrets. La seconde est une adaptation du tétraèdre de Paynter aux flux manufacturiers. Ces deux premiers types de propositions servent de base à la proposition d'un modèle formel d'un flux manufacturier dans un formalisme NIAM. Enfin, un macro-modèle de simulation des flux manufacturiers, où les opérateurs d'objets du flux et du flux lui-même sont présentés, est proposé. Une symbolique graphique est associée à chaque type d'opérateurs.

Ces propositions sont partiellement validées par simulation sur un modèle du SFP (Système Flexible de Production) de l'A IPL (Atelier Inter-établissement de Productique Lorraine).

**Mots Clés**

Contrôle par le flux, Flux, Modélisation, Mésoscopique, Logistique, Simulation