

**- PARTIE 4 -**  
***Modélisation et simulation  
de flux de production***

## Sommaire

<b>Introduction .....</b>	<b>90</b>
<b>I- Définitions.....</b>	<b>92</b>
<input type="checkbox"/> I.1- Définition de la simulation de flux .....	92
<input type="checkbox"/> I.2- Classification des modèles de simulation .....	92
<input type="checkbox"/> I.3- Terminologie utilisée en simulation à événements discrets.....	96
<b>II- Limites et objectifs de la simulation .....</b>	<b>98</b>
<input type="checkbox"/> II.1- Ce que la simulation peut faire.....	98
<input type="checkbox"/> II.2- Ce que la simulation ne peut pas faire (seule).....	99
<b>III- Résumé de quelques travaux de recherche utilisant la simulation .....</b>	<b>101</b>
<b>IV- Méthodologie de conduite d'une simulation .....</b>	<b>102</b>
<input type="checkbox"/> IV.1- Analyse du problème .....	103
<input type="checkbox"/> IV.2- Modélisation et programmation.....	104
<input type="checkbox"/> IV.3- Expérimentations sur le modèle.....	106
<input type="checkbox"/> IV.4- Rapport et conclusions .....	108
<b>V- Approfondissement de la démarche de modélisation .....</b>	<b>110</b>
<input type="checkbox"/> V.1- Objectifs d'un Modèle Graphique de Connaissances .....	111
<input type="checkbox"/> V.2- Etat de l'art et pratiques industrielles sur les modèles graphiques.....	112
<i>V.2-a) Analyse de déroulement .....</i>	<i>112</i>
<i>V.2-b) Travaux de recherche.....</i>	<i>115</i>
<input type="checkbox"/> V.3- Proposition d'un Modèle Graphique de Connaissances .....	118
<b>VI- Implémentation du modèle du système expérimental .....</b>	<b>126</b>
<input type="checkbox"/> VI.1- Modèle géométrique du système physique .....	126
<input type="checkbox"/> VI.2- Modèle Graphique de Connaissances .....	127
<input type="checkbox"/> VI.3- Modèle d'action.....	129

**Conclusion ..... 133**

**Bibliographie ..... 134**

## Introduction

Dans cette partie on va présenter et justifier l'utilisation d'un outil informatique permettant de simuler le comportement dynamique de la ligne expérimentale. Bien que l'on dispose du système réel, en grandeur nature, des expérimentations, mêmes simples, entraînent des temps de réponse qui peuvent s'avérer importants. De plus, la collecte de données peut présenter non seulement des difficultés au niveau du mesurage, mais aussi certaines imprécisions. Pour réduire, voire même supprimer ces problèmes, deux possibilités sont offertes :

- une modélisation mathématique,
- une modélisation simulateur.

C'est la deuxième possibilité qui est utilisée dans ce travail de recherche. On peut justifier ce choix par le fait que le modèle de simulation peut reproduire très précisément le comportement d'un atelier de production et est utilisé comme une expérience virtuelle. Il ne fournit pas directement une solution analytique au problème posé. Dans cette partie, et pour l'ensemble de ce travail, il est sous-entendu que la simulation dont on parle est à événements discrets (voir chap. 1).

Il faut aussi rappeler que la simulation de flux est un outil informatique qui est de plus en plus utilisé par les industriels et par les chercheurs. [LAW 91, page 2] cite plusieurs enquêtes (aux Etats-Unis) qui montrent la place de la simulation dans l'industrie : l'une d'elles indique que parmi 14 techniques utilisées, la simulation arrive en 2<sup>ème</sup> position pour 84% des entreprises sondées. Pour les chercheurs, le principal intérêt est de pouvoir travailler sur un système de production virtuel, dont le comportement peut être très proche du système réel, à moindre coût et sans aucun risque. Dans le domaine de l'optimisation et de la prise de décision, les autres avantages de la simulation font que cet outil permet, depuis une dizaine d'années seulement, de mettre en œuvre des méthodes qu'il était inimaginable d'appliquer sur les systèmes réels ou sur des modèles mathématiques.

Dans le chapitre 1, on définit la simulation de flux à événements discrets ainsi que la terminologie utilisée dans ce domaine.

Le chapitre 2 permet de voir quelles sont les limites de la simulation de flux.

Des travaux de recherche utilisant la simulation de flux sont résumés dans le chapitre 3.

Une méthodologie de conduite d'une étude de simulation est proposée dans le chapitre 4. On présente les différentes étapes à suivre, et parmi elles, l'étape de modélisation qui est la plus délicate.

Dans le chapitre 5, l'étape de modélisation est approfondie et l'on montre l'intérêt de l'utilisation d'un modèle graphique de connaissance. Après un état de l'art des modèles

graphiques permettant de décrire et d'analyser les flux, on propose un formalisme qui nous semble bien adapté à la simulation de flux. Plusieurs modèles graphiques sont élaborés à partir de ce formalisme, appliqués aux différents modes de pilotage des flux vus dans la partie 1.

Ce formalisme est ensuite appliqué au système expérimental dans le chapitre 6. On présente en fin de chapitre le codage du modèle d'action avec le progiciel WITNESS.

## I- Définitions

### □ I.1- Définition de la simulation de flux

La simulation des flux de production intègre à la fois la construction d'un modèle et l'utilisation expérimentale de ce modèle pour étudier un problème.

Le modèle consiste en une représentation d'un système réel, capable de reproduire son fonctionnement.

La simulation est l'activation du modèle dans le temps, afin de connaître son comportement dynamique et de prédire son comportement futur [CLAVER 97].

La simulation est principalement utilisée pour étudier les flux physiques (pièces, matières, outils, etc...) et informationnels (Ordres de Fabrications, Kanban, etc... ) dans l'atelier et les disponibilités des ressources (opérateurs, machines, convoyeurs, etc.).

Elle ne permet pas de trouver directement et de façon optimale des solutions à des problèmes de production. En cela, on peut l'assimiler à une simple boîte noire qui réagit aux consignes qu'on lui donne (variables d'entrée), mais incapable, seule, de déterminer la valeur optimale de ces consignes.

On l'utilise en général pour évaluer et comparer des scénarios possibles.

Ses capacités d'imitation et de prédiction permettent d'obtenir des renseignements sur les conséquences de changements ou de modifications dans l'atelier (au niveau physique ou décisionnel), avant que ceux-ci ne soient effectués.

Les modèles de simulation sont capables de décrire le système avec le degré de détail et de précision nécessaire qui convient à la résolution du problème posé.

Cette description inclut la partie physique de l'atelier , mais peut aussi inclure certains aspects du système de pilotage (gestion de production).

### □ I.2- Classification des modèles de simulation

[LAW 91] propose une classification des modèles de simulation qui distingue les *Modèles Physiques* des *Modèles Logico-mathématiques*.

- **Les modèles physiques** sont ceux dans lesquels le système réel est représenté par une réplique ou une maquette, à une échelle différente et éventuellement à l'aide de matériaux différents. Ils sont utilisés à des fins d'entraînement :

simulateurs de vol, de conduite, maquettes de véhicules pour des essais aérodynamiques,...

- **Les modèles Logico-Mathématiques ou symboliques** sont définis par des relations logiques et quantitatives qui sont manipulées et changées pour voir comment le modèle du système réel réagit. Ils sont exécutés sur des ordinateurs. C'est exclusivement ce type de modèle qui sera utilisé dans la suite de ce travail.

Une autre distinction concerne la prise en compte d'aléas ou de variations aléatoires dans le modèle.

- Si le système est indépendant de l'influence de variables aléatoires ou imprévisibles, on utilise un **modèle déterministe**.

- Si les aléas jouent un rôle significatif dans le comportement du système (exemple typique : les pannes), on utilise un **modèle stochastique**. C'est ce type de modèle qui sera utilisé dans la suite de ce travail.

Une troisième classification distingue :

- **les modèles statiques**, pour lesquels le temps n'intervient pas.

*Exemple : modèle comptable permettant de calculer le bénéfice en fin d'année à l'aide d'un tableur.*

- **les modèles dynamiques**, pour lesquels le comportement est une fonction du temps.

*Exemple : système de maintenance dans une usine.*

Enfin, à l'intérieur des *modèles dynamiques*, on distingue :

- **les modèles à événements discrets** (ou discontinus) dans lesquels les changements d'état ne surviennent que lors d'événements tels le début ou la fin d'une opération, la mise en attente d'une pièce dans un stock, la libération d'une ressource, ... Dans une simulation à événements discrets, les flux essentiels que l'on examine sont composés d'éléments isolables que l'on peut dénombrer et identifier individuellement. Ces éléments sont couramment appelés "Entités" ou "Articles" (voir Chap. 1.3).

- **les modèles continus**, plus adaptés aux flux continus, qui utilisent des équations mathématiques pour prendre en compte les changements d'état qui s'effectuent de façon continue au cours du temps. Les valeurs des variables d'état sont recalculées régulièrement selon un pas d'horloge d'après ces équations.

*Exemple : un réacteur chimique.*

- **les modèles combinés** (ou mixtes), qui intègrent les deux aspects.

Exemple : industrie métallurgique ou agro-alimentaire.

Synthèse de cette classification :

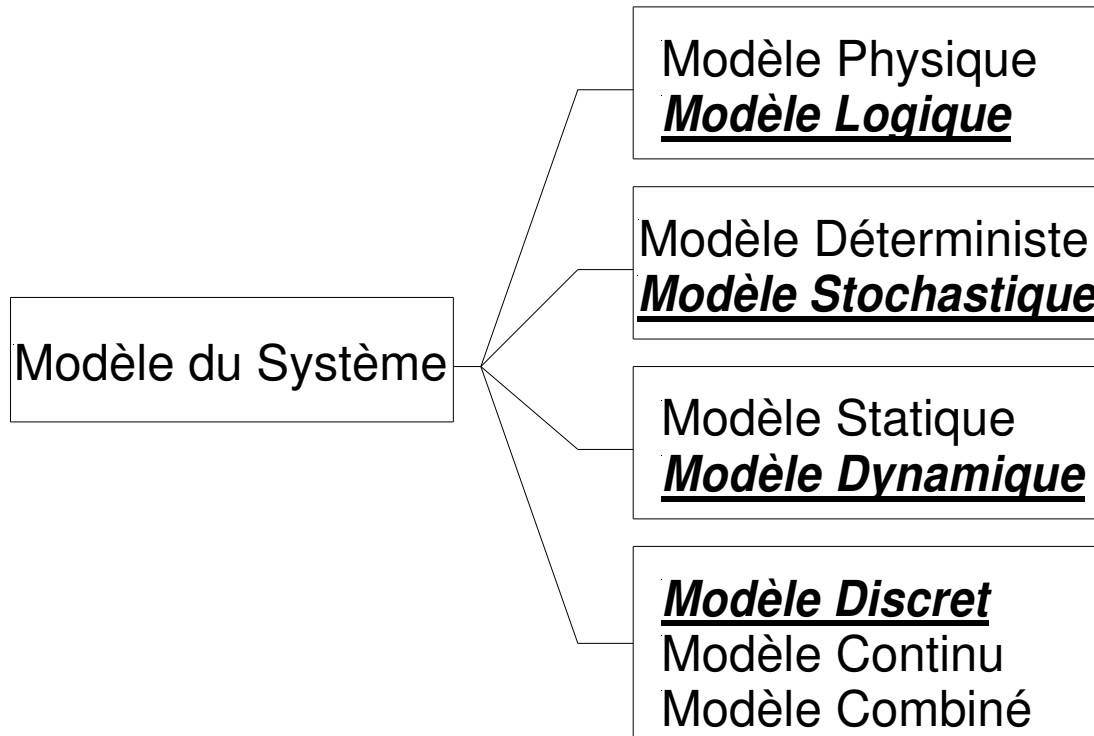


Figure 1 : Classification des modèles  
(en souligné et italique, le type de modèle utilisé dans ce travail)

Dans la suite de ce travail, seuls les modèles à événements discrets seront utilisés.

Dans [CERNAULT 88], on trouve encore une autre classification de la modélisation pour la simulation de flux en fonction de l'approche :

**- L'approche par événements :**

C'est l'approche la plus générale. Elle consiste à rassembler tous les événements qui peuvent se produire et à décrire la logique des changements d'état.

On peut distinguer dans la logique des changements d'état :

- des règles liées aux modes opératoires sur le procédé de fabrication.

*Exemple : fin de l'usinage d'une pièce.*



- des règles liées à la conduite / gestion.

*Exemple : Si le lot A est prêt avant le lot B, alors démarrer la fabrication du lot C sur le traitement thermique.*

La difficulté des règles de conduite aux postes de fabrication est une des difficultés de cette approche.

Une fois le travail effectué pour la phase de modélisation, l'écriture du modèle consiste à programmer la logique des changements d'état. Le logiciel doit être en mesure de stocker la liste des événements créés. Le déroulement de la simulation consiste en la recherche, dans la liste, du prochain événement prévu.

L'échéancier est le module qui gère l'avance du temps au fur et à mesure que les événements apparaissent.

#### **- L'approche par activités :**

C'est une approche qui s'appuie sur un raisonnement naturel : un procédé est décrit comme l'enchaînement d'activités et d'attentes. On peut le regarder à travers les activités en indiquant les conditions nécessaires à leur début et à leur fin.

Les attentes débutent à la fin de chaque activité. Elles se terminent lorsque les conditions nécessaires à l'activité suivante sont réunies.

La modélisation consiste à programmer les conditions de déclenchement et de fin des activités. A chaque incrémentation du temps, on examine si les conditions de début et de fin des activités sont réalisées.

#### **- L'approche par processus :**

On parle de cette approche lorsque la modélisation consiste à rassembler des processus.

Les processus sont formés de séquences d'événements et d'activités : durée d'une activité, utilisation d'une machine, stockage de pièces, ...

Ces processus peuvent être paramétrés. Dans le logiciel, ils correspondent à des sous-programmes ou à des primitives avec lesquels on peut décrire le fonctionnement d'une installation. La puissance d'un logiciel sera liée aux processus mis à la disposition de l'utilisateur (manutention par robot, par convoyeur, ...).

Le graphique de la figure 2 [CETIM 89] donne un aperçu des principaux logiciels de simulation en faisant apparaître l'approche utilisée et le niveau de convivialité.

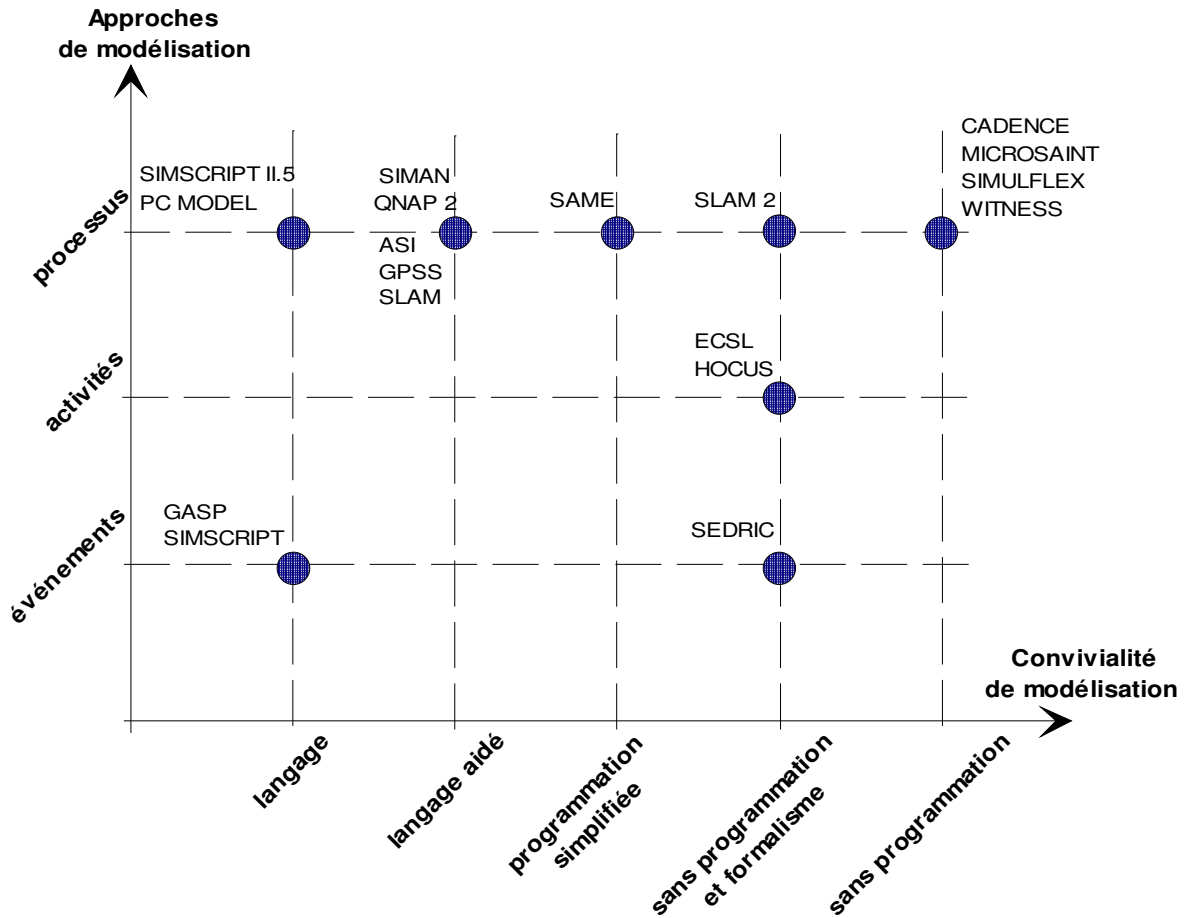


Figure 2 : Les approches de modélisation en fonction des progiciels

□ 1.3- Terminologie utilisée en simulation à événements discrets

Chaque progiciel de simulation de flux manipule des éléments de base qui sont :

- **Entité ou Article** : Un article est l'élément isolable composant le flux discret. Il se déplace individuellement à travers le modèle.

*Exemple : Dans un atelier, les articles sont les pièces à fabriquer.*

- **File d'attente ou Stock** : Les stocks sont des éléments qui permettent d'accumuler des articles entre deux machines. Les stocks peuvent être gérés de différentes façons : FIFO, LIFO, avec critère de priorité, en vrac, ....

- **Opération ou Machine** : C'est un élément qui prélève des articles d'un autre élément (un stock ou une autre machine), les traite pendant un temps de cycle qui correspond à un délai fixé dans une unité de temps appropriée.

Les articles, stocks et machines constituent l'essentiel des éléments physiques d'un modèle de simulation à événements discrets. Pour faire fonctionner le modèle ou pour prélever des informations, on a aussi besoin d'éléments logiques, qui se décomposent en deux catégories :

- **Les Variables** : Ce sont des valeurs qui caractérisent les éléments du système en entier. On peut y accéder depuis n'importe quel élément physique du modèle. L'analogie avec un langage de programmation structurée est la notion de *variable globale*.

- **Les Attributs** : Ce sont des variables spécifiques à un article donné et qu'il porte avec lui pendant sa durée de vie dans le modèle. C'est en quelque sorte la carte d'identité d'un article, dans laquelle on pourra mettre par exemple l'heure d'arrivée et l'heure de sortie d'un article, son temps de cycle sur une machine, le nombre de trous à percer sur une autre machine, etc.... Plusieurs articles différents ou identiques peuvent donc porter le même attribut, mais celui-ci pourra avoir des valeurs différentes.

Une autre particularité des modèles à événements discrets est le type d'expérimentation en simulation que l'on veut faire. Au moment où l'on lance une simulation (à  $T = 0$ ), le modèle est vide et ne contient aucun article. Deux types d'expérimentation peuvent être programmés :

- **Expérimentation à Horizon Fini ou Terminatif** : Dans ce cas, la simulation s'exécute jusqu'à ce qu'une condition soit vérifiée. Par exemple un atelier qui fonctionne jusqu'à ce que tous les articles aient été traités. Au début de la simulation, l'atelier est vide, tout comme à la fin de la simulation.

- **Expérimentation à Horizon infini ou à Régime Stabilisé** : dans ce type d'expérimentation, on désire étudier le comportement de l'atelier uniquement en régime stabilisé, sans tenir compte de la période de montée en régime ou du vidage de l'atelier. Il n'y a donc pas forcément de condition d'arrêt liée à l'absence d'article, mais l'on définit une durée de simulation suffisamment significative pour laisser au système le temps de se stabiliser. Aucune méthode analytique n'a été trouvée dans la littérature pour déterminer la durée de la période de montée en régime. En pratique, pour la déterminer, les experts de la simulation recommandent de mesurer le niveau total d'encours dans le modèle ou le flux sortant (en

article/unité de temps). En effet, au début de la simulation, le niveau d'encours va monter progressivement puis se stabiliser. De la même façon, le flux sortant sera d'abord nul, puis va augmenter et se stabiliser entre deux valeurs acceptables.

Lors des expérimentations menées pour ce travail (voir la Partie 5), ces deux types de simulation seront réexaminées pour le cas étudié.

## II- Limites et objectifs de la simulation

### □ II.1- Ce que la simulation peut faire

Avant d'utiliser cet outil, il est important de savoir ce que l'on peut en attendre, notamment par rapport aux outils de modélisation mathématique.

Voici une liste non exhaustive des possibilités offertes à l'utilisateur de la simulation de flux :

#### - FOURNIR DES ESTIMATIONS REALISTES :

- du comportement attendu du système,
- des variations à l'intérieur du système.

#### - EVALUER LES EFFETS DES ACTIONS SUIVANTES :

- ajouter, déplacer ou supprimer des machines,
- modifier les flux,
- modifier les durées de processus et / ou de montage,
- introduire de nouveaux produits ou supprimer des produits existants,
- modifier les systèmes de manutention,
- modifier l'ordonnancement et la répartition des tâches,
- ajouter ou supprimer du personnel,
- ....

Cette liste montre bien l'intérêt qui peut être porté à cet outil informatique, non seulement auprès des industriels, mais aussi auprès des chercheurs pour vérifier leur théorie.

□ II.2- Ce que la simulation ne peut pas faire (seule)

- Elle ne peut pas optimiser la performance d'un système. Elle peut seulement donner des réponses à des questions du genre : " Qu'est-ce qui se passe si ... ?"

Comme on l'a déjà dit, une fois que le modèle est programmé et validé, la simulation fonctionne comme une boîte noire en fonction d'un scénario de fonctionnement. Elle ne fait donc que reproduire le comportement du système modélisé.

- Elle ne peut donner des résultats justes si les données sont imprécises.

Un point très important, et sur lequel on n'insiste jamais assez, concerne les données utilisées par la simulation. Il est indispensable de vérifier la validité de ces données sous peine d'obtenir des résultats sans commune mesure avec ceux obtenus sur le système réel. Cela est particulièrement critique quand le système simulé est d'un niveau de complexité ne permettant pas une vérification analytique des résultats fournis par la simulation. L'article de [BALLOT 97] qui compare la simulation de flux avec la recherche opérationnelle, indique que la qualité des résultats de la simulation dépend exclusivement de la qualité des règles de fonctionnement et des données introduites lors de la modélisation. Les outils de simulation permettent toujours d'obtenir un résultat, mais n'apportent rien quant à sa validité par rapport au système réel que l'on simule.

- Elle ne peut décrire les caractéristiques d'un système qui n'a pas été complètement modélisé.

La phase de modélisation se déroule généralement en plusieurs étapes. On commence par construire un modèle global du système, puis on l'affine progressivement, en suivant éventuellement une méthodologie [DUFRENE 94], en validant chaque étape avant de perfectionner le modèle. Le problème qui se pose lors de la modélisation est de savoir jusqu'à quel niveau de détail il faut aller pour que le modèle soit représentatif de la réalité. En ce sens, il est donc préférable de rechercher à affiner le modèle, plutôt que de se contenter d'un modèle trop général et imprécis.

- Elle ne peut résoudre des problèmes mais seulement fournir des indications à partir desquelles des solutions peuvent être déduites.

Lorsque le modèle est prêt à être utilisé pour la simulation, il faut encore se poser la question de savoir quelles sont les informations que l'on veut observer pendant ou à la fin de la simulation. Ces informations, appelées "Indicateurs" sont des variables du système sur lesquelles un traitement statistique est effectué. La majorité des progiciels proposent en standard des résultats de simulation sous la forme de rapports statistiques qui peuvent

être agrémentés de graphiques pour faciliter l'analyse. Les indicateurs "standard" concernent essentiellement les quantités et les durées relatives aux flux d'articles, ainsi que les taux d'utilisation, de panne, d'arrêt des machines et ressources. Les figures 3 et 4 présentent des exemples de rapports statistiques.

C'est uniquement à partir de l'observation du modèle et des indicateurs pendant et après la simulation que l'on peut tenter de résoudre le problème posé.

Nom	Qté. Entrée	Qté. Expédiée	Qté. Rebutée	Qté. Assemblée	Qté. Rejetée	En Cours	E. Cours Moy.	Tps Moy.
TETE	601	0	0	601	1	0	4	13.98
CORPS	603	0	0	601	0	2	3.6	12.53
VIS	1206	0	0	1202	0	4	2.46	4.28
ASSM	601	600	0	0	0	1	2.85	9.98

Figure 3 : Rapport statistique des Articles

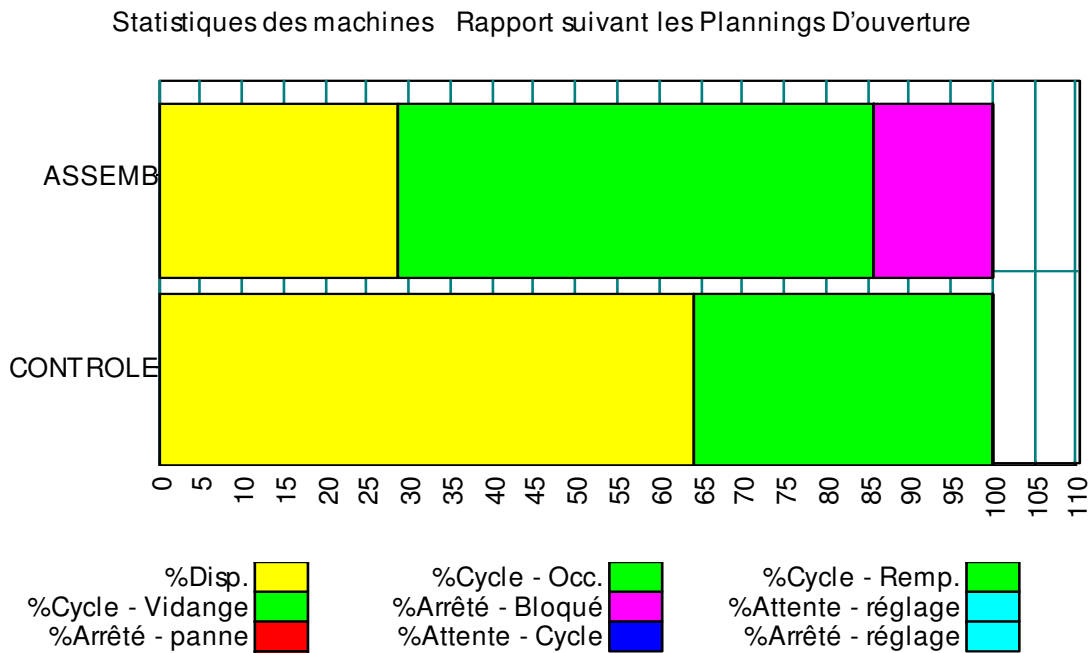


Figure 4 : Rapport statistique des Machines

### III- Résumé de quelques travaux de recherche utilisant la simulation

Beaucoup de travaux de recherche s'appuient sur la simulation pour traiter des problèmes d'ordonnancement. En voici quelques exemples :

- [CAUX 95] pose le problème des dates d'introduction des pièces dans un système de traitement de surfaces. La simulation est utilisée pour évaluer l'ordonnancement proposé par une heuristique de placement des pièces et une optimisation par la méthode du Grimpeur (voir partie 7).
- [GOUJON 96] présente un étude destinée à optimiser la planification d'un chantier de moulage au sable. L'optimisation est réalisée par un couplage entre simulation et algorithmes stochastiques de type Recuit Simulé, Grimpeur et Kangourou. Les améliorations du temps de production sont considérables puisqu'elles atteignent 80% de gain par rapport à la solution initiale avec la méthode Kangourou.
- [BOUKACHOUR 96] et [BAVAY 96] proposent un système d'ordonnancement par simulation qui permet de planifier non seulement "au plus tôt", ce qui est la démarche classique, mais aussi "au plus tard". Ce mode d'ordonnancement est appelé ici "Retro-simulation" ou simulation arrière.

La simulation peut aussi être utilisée dans le domaine de la maintenance des systèmes de production, pour choisir des indicateurs ou pour mesurer les effets des pannes sur le fonctionnement global du système.

- [PERES 97] utilise la simulation de flux pour tester des indicateurs de performances prenant en compte les effets directs des actions de maintenance. La simulation doit pouvoir restituer les trois processus de base dont dépend l'évolution des systèmes de production : processus de sollicitation/réponse, processus de défaillance/réparation et processus d'inspection/révision. Il est précisé par ailleurs que les logiciels de simulation offrent la possibilité de prise en compte des défaillances, mêmes s'ils ne présentent pas de fonctionnalités dédiées à la maintenance.

Enfin, on peut citer quelques travaux récents qui utilisent à la fois le concept de modélisation "multi-agents" pour spécifier le système de conduite et la simulation pour tester les algorithmes de résolution des agents :

- [QUERE 97] simule le fonctionnement d'un convoyeur à entrées/sorties multiples dont le sous-système de décision est modélisé par l'approche multi-agents. Un agent est placé sur chaque poste de chargement du convoyeur et la simulation est utilisée pour évaluer les algorithmes de résolution des agents.

- [KIEFFER 98] étudie un processus de production complexe (fabrication de semi-conducteurs) qui comporte de nombreux bouclages de flux et qui pose le problème de la synchronisation de composants. La simulation est utilisée parce qu'aucun outil d'ordonnancement n'est capable de prendre en compte en un temps raisonnable le nombre important de tâches à traiter, les multiples rebouclages et les aléas des équipements. Quant à l'approche multi-agents, elle permet de décentraliser et de coordonner les centres de décision d'ordonnancement afin d'augmenter la réactivité du pilotage face aux aléas. Le simulateur est utilisé en phase d'exploitation de la ligne de production et permet d'affiner les temps de cycle. D'autre part, il peut être alimenté par des données de suivi de production et permettre ainsi d'indiquer aux exploitants les décalages de délai.

#### IV- Méthodologie de conduite d'une simulation

Dans ce chapitre, l'objectif est de proposer une méthodologie générale pour la réalisation d'un projet de simulation de flux. L'objectif de cette méthodologie est non seulement de fournir un fil conducteur à tout projet de simulation, mais aussi de s'assurer, avant le début du projet, que l'on est en possession de toutes les données utiles. Une étude de simulation de flux se déroule généralement en quatre macro-étapes (figure 5):

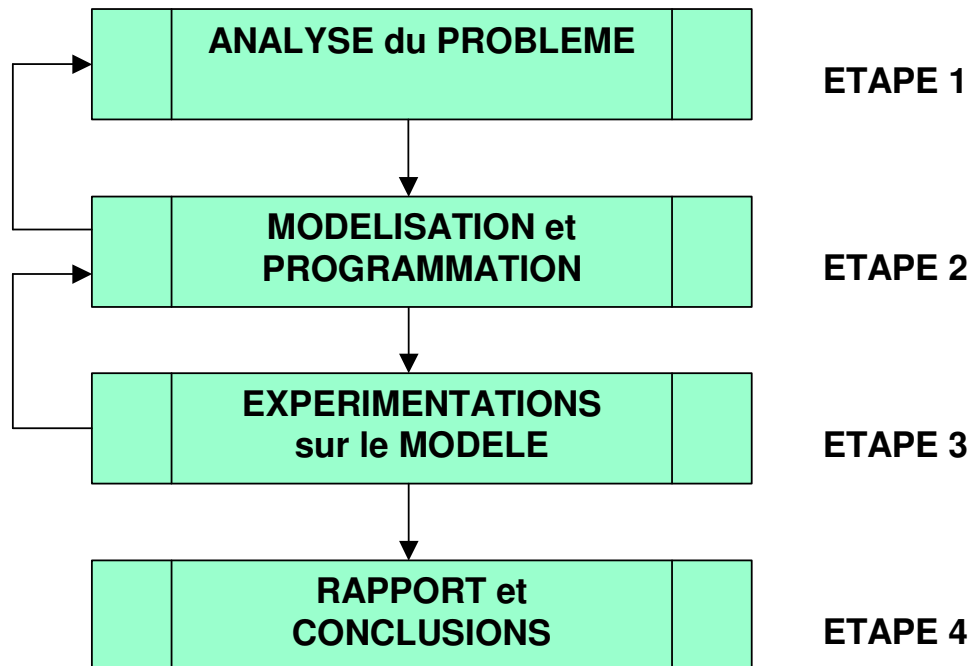


Figure 5 : Les 4 étapes d'une étude de simulation



Comme on le voit sur la figure 5, ces macro-étapes se déroulent de façon séquentielle, mais des rebouclages ou des retours en arrière sont possibles afin de corriger ou de compléter l'élaboration du modèle en fonction des objectifs fixés.

Chacune de ces macro-étapes va maintenant être détaillée en plusieurs étapes et l'on va faire ressortir plus précisément l'enchaînement du projet.

#### □ IV.1- Analyse du problème

L'analyse du problème est un préliminaire indispensable et d'une grande importance, puisque c'est dans cette étape que l'on doit définir précisément ce que l'on veut mettre en évidence avec la simulation, et quelle précision on attend. On détermine aussi les indicateurs de performance qui vont permettre de vérifier si l'on atteint les objectifs que l'on s'est fixé. Enfin, il faut pouvoir fournir des données numériques au modèle. Celles-ci sont relatives à tous les éléments utilisés dans la simulation, comme par exemple :

- **Données sur les articles à fabriquer** : gammes de fabrication (routage), loi d'arrivée dans le modèle (fréquence et taille de lot).
- **Données sur les moyens de production** : nombre et types de machines, lois de pannes, nombre et types de ressources complémentaires de production (outils, palettes, etc...)
- **Données sur les systèmes de manutention** : nombre et type de convoyeurs ou de chariots, capacité en nombre d'articles, vitesse de déplacement, etc...
- **Données sur les stocks et les magasins** : types et capacités, règles d'entrée et de sortie, etc...
- **données sur le personnel** : effectifs, compétences et horaires.

A ces données numériques, il convient d'en ajouter d'autres qui s'expriment sous forme logique et qui caractérisent les règles de pilotage de l'atelier. Il est à noter que bien souvent, l'objectif de la simulation est de tester certaines règles pour déterminer les plus pertinentes. A titre d'exemple :

- **Règles de lancement et de séquençement des articles en fabrication** : à la commande ou en fonction des prévisions, par lots ou à l'unité, périodique ou apériodique,...
- **Règles d'ordonnancement** des articles sur les différentes machines de l'atelier.
- **Règles d'affectation des ressources.**

Il est à noter que de nombreux chercheurs utilisent la simulation pour tester de nouvelles règles de pilotage, notamment dans le domaine de l'ordonnancement et de la planification à moyen terme [DRAKE 98], [BOSTEL 97], ....

Enfin, en complément aux données numériques et logiques, on doit disposer de documents graphiques, à la fois pour avoir une représentation géométrique (ou spatiale) du système simulé, mais aussi pour avoir une représentation des flux. On utilisera en guise de modèle géométrique un plan de masse de l'atelier à simuler. La macrographie des flux permet de décomposer le processus en actions élémentaires tels que opérations, stockages, transferts et contrôles. Dans le chapitre 6 de cette partie, un modèle graphique de connaissance sera développé afin de formaliser cette macrographie des flux.

La figure 6 montre comment l'analyse du problème peut être découpée en plusieurs étapes.

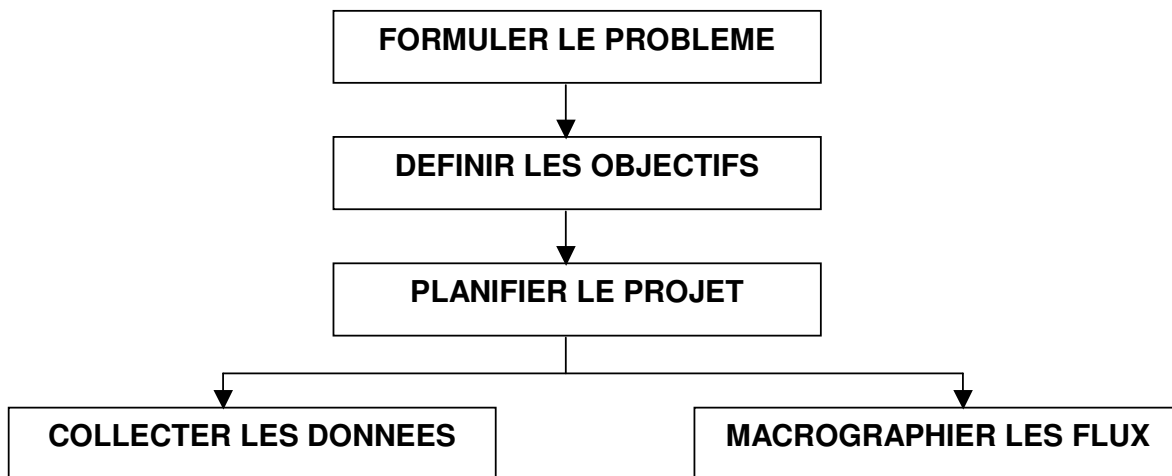


Figure 6 : Détail de la macro-étape "Analyser le problème"

#### □ IV.2- Modélisation et programmation

La construction du modèle permet de coder le modèle dans un langage informatique approprié. Cette étape est de plus en plus facilitée par l'évolution des progiciels dont la tendance est de substituer aux primitives d'un langage une interface graphique, interactive et conversationnelle. Le concepteur du modèle n'a plus besoin d'être un informaticien aguerri pour utiliser la simulation de flux. La figure 7 montre par exemple une fenêtre à renseigner pour modéliser une machine avec ce type de langage [LANNER 98].

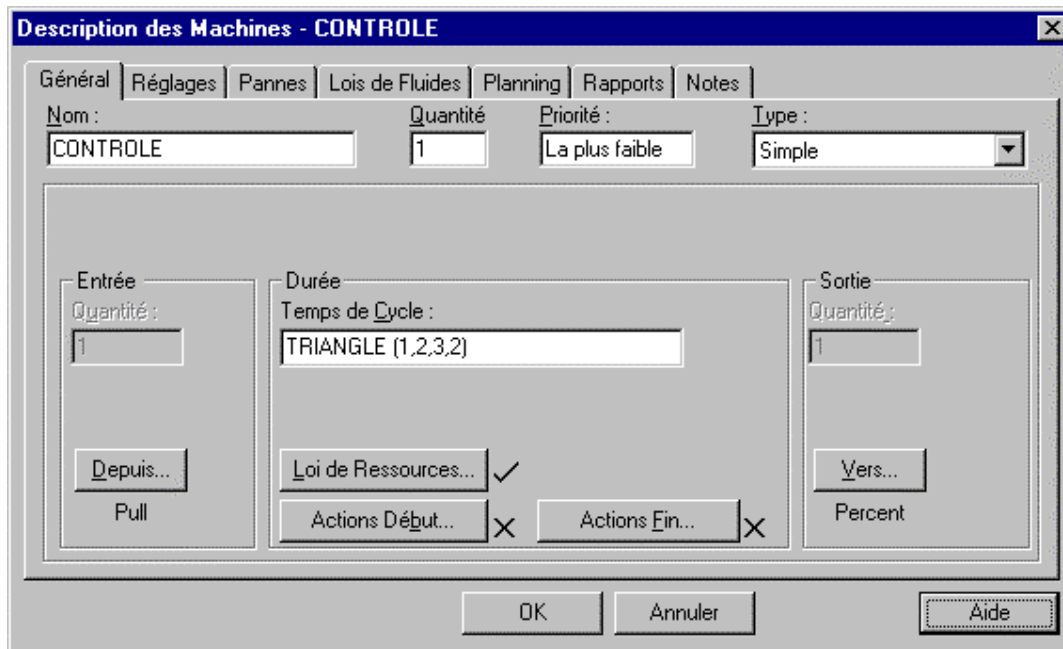


Figure 7 : Exemple de fenêtre de saisie d'un progiciel de simulation (Witness)

Une fois le modèle réalisé, il faut vérifier si les règles logiques qui décrivent le flux sont bien programmées et correspondent à ce qui est demandé. On exécute donc des tests de simulation uniquement pour vérifier le bon fonctionnement du modèle. Si des différences apparaissent, il faut pouvoir "tracer" tous les événements du modèle et vérifier leur cohérence par rapport aux données. La plupart des progiciels disposent d'une fonction qui permet de visualiser le fonctionnement du modèle événement par événement (figure 8).

```

9.00 : Article_A(s) arrive(nt)
11.79 : La machine PREPARATION quitte l'état Occupée
Article_B en sortie de l'élément PREPARATION vers Stock_2
Article_B en entrée de l'élément PEINTURE à partir de Stock_2
Article_A en entrée de l'élément PREPARATION à partir de Stock_1
Ressource obtenue par CONTROLE
12.00 : Article_B(s) arrive(nt)
Article_B en sortie vers Stock_1
12.00 : Article_A(s) arrive(nt)
13.00 : temps mis à jour
13.39 : La machine CONTROLE quitte l'état Occupée
Article_A en sortie de l'élément CONTROLE vers SHIP
Ressource obtenue par PEINTURE
13.89 : La machine PEINTURE essaye de quitter l'état Réglage pour le
réglage n° 1
Ressource obtenue par PREPARATION

```

Figure 8 : Exemple de visualisation de la trace des événements

Cette étape doit se terminer par une validation qui consiste par exemple à comparer les résultats fournis par le modèle aux résultats du système réel si celui-ci existe. Les rapports statistiques peuvent aider à cette validation entre résultats simulés et résultats réels.

La visualisation graphique et dynamique du modèle est un atout considérable pour en faciliter sa vérification et sa validation, puisque l'on peut suivre tous les changements d'état qui interviennent sur le modèle.

L'enchaînement des étapes de la modélisation et de la programmation est présenté sur la figure 9.

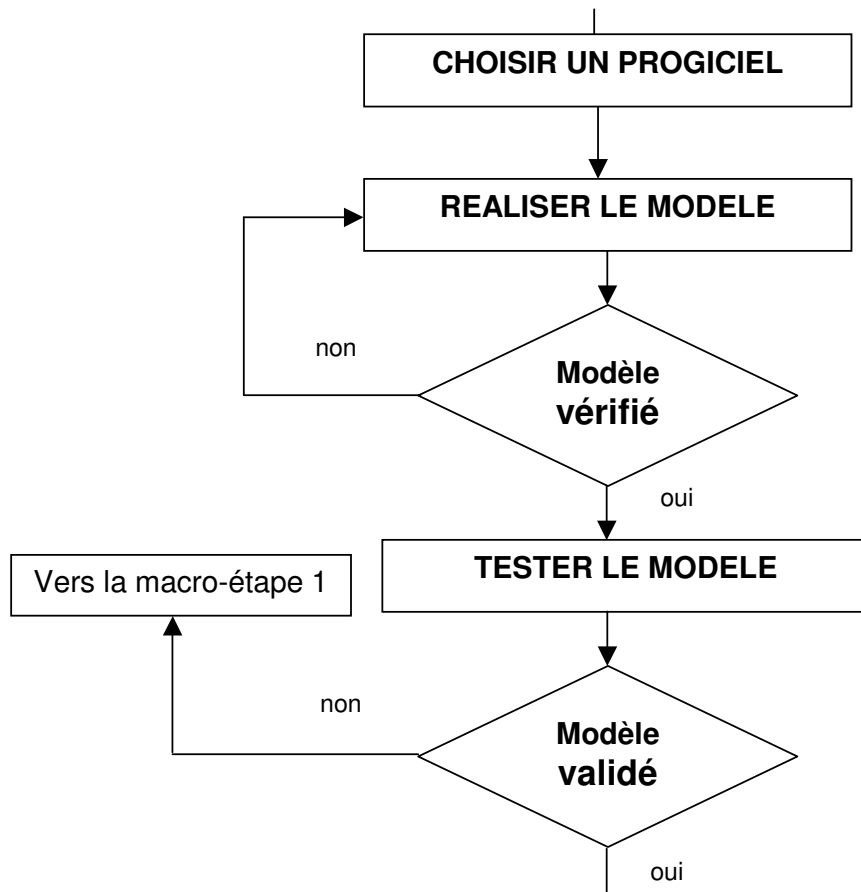


Figure 9 : Détail de la macro-étape "Modéliser et Programmer"

#### □ IV.3- Expérimentations sur le modèle

L'exploitation de la simulation est l'étape où l'on utilise le modèle comme support expérimental pour évaluer le comportement dynamique du système. Il faut bien sûr avoir

défini les données sur lesquelles on va pouvoir agir pour atteindre les objectifs que l'on s'est fixé dans la 1ère étape. Un scénario ou une expérimentation se caractérise donc par un jeu de données qui varie à chaque itération du processus expérimental. Des méthodes telles que les Plans d'Expériences [PILLET 92] peuvent être utilisées pour organiser les scénarios, réduire leur nombre et interpréter les résultats.

[DELAMARE 93] propose justement une utilisation combinée de la simulation de flux et des Plans d'Expérience (méthode Tagushi) pour améliorer l'organisation d'atelier dans l'industrie du bois. On trouve aussi dans cet article une représentation fonctionnelle (par diagrammes SADT) de la méthodologie de conduite d'une simulation.

On montrera dans la partie 7 (optimisation de la production) que l'utilisation des plans d'expériences n'est pas adaptée à des problèmes d'optimisation complexes, où le nombre de solutions est très grand. Dans ce cas, la simulation est couplée à un générateur de solutions et les résultats sont ensuite analysés par un algorithme d'optimisation. Cette approche fait partie de ce travail de recherche et est présentée dans la Partie 8.

Enfin, il faut être capable d'interpréter les résultats fournis par la simulation. Cela suppose la maîtrise de notions de statistique telles que l'*intervalle de confiance*, la *moyenne arithmétique ou temporelle*, l'*écart type* et éventuellement l'*analyse spectrale* [CERNAULT 88], [LAW 91].

La figure 10 présente le détail de cette macro-étape d'expérimentations sur le modèle.

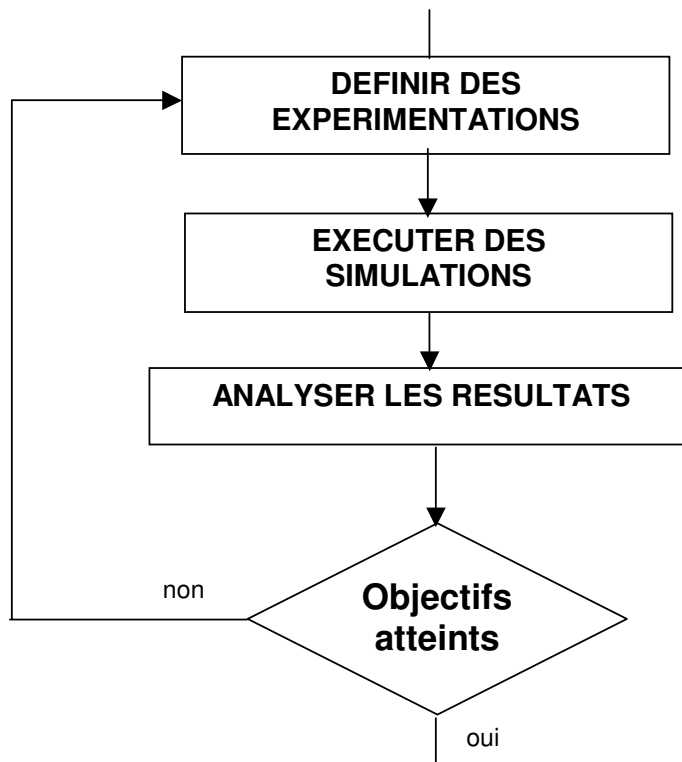


Figure 10 : Détail de la macro-étape "Expérimentations sur le modèle"

#### □ IV.4- Rapport et conclusions

Cette dernière macro-étape est importante vis-à-vis du demandeur de l'étude de simulation. En effet, celui-ci n'est pas forcément un expert dans ce domaine et il va falloir présenter les résultats de l'étude pour qu'ils soient compréhensibles. Entre autre, il faut tenir compte des remarques suivantes :

- Ne pas « noyer » le demandeur dans des tableaux de chiffres insignifiants pour lui.
- Expliquer les indicateurs utilisés.
- Justifier les hypothèses simplificatrices.
- Utiliser un grapheur pour présenter les résultats.
- Présenter les différentes solutions donnant le même résultat et proposer des critères de choix.
- Suggérer de nouvelles pistes d'étude.

Cette macro-étape est détaillée dans la figure 11 :

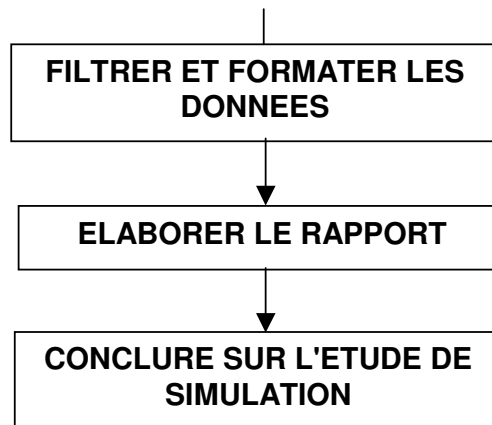


Figure 11 : Détail de la macro-étape " Rapport et conclusion"

Dans ce chapitre, une méthodologie de conduite d'un projet de simulation de flux a été proposée sous forme de macro-étapes, elles-mêmes découpées en plusieurs étapes et rassemblées sous la forme d'un organigramme. La figure 12 est la représentation complète de cet organigramme, étape par étape, en faisant apparaître les limites de chaque macro-étape.

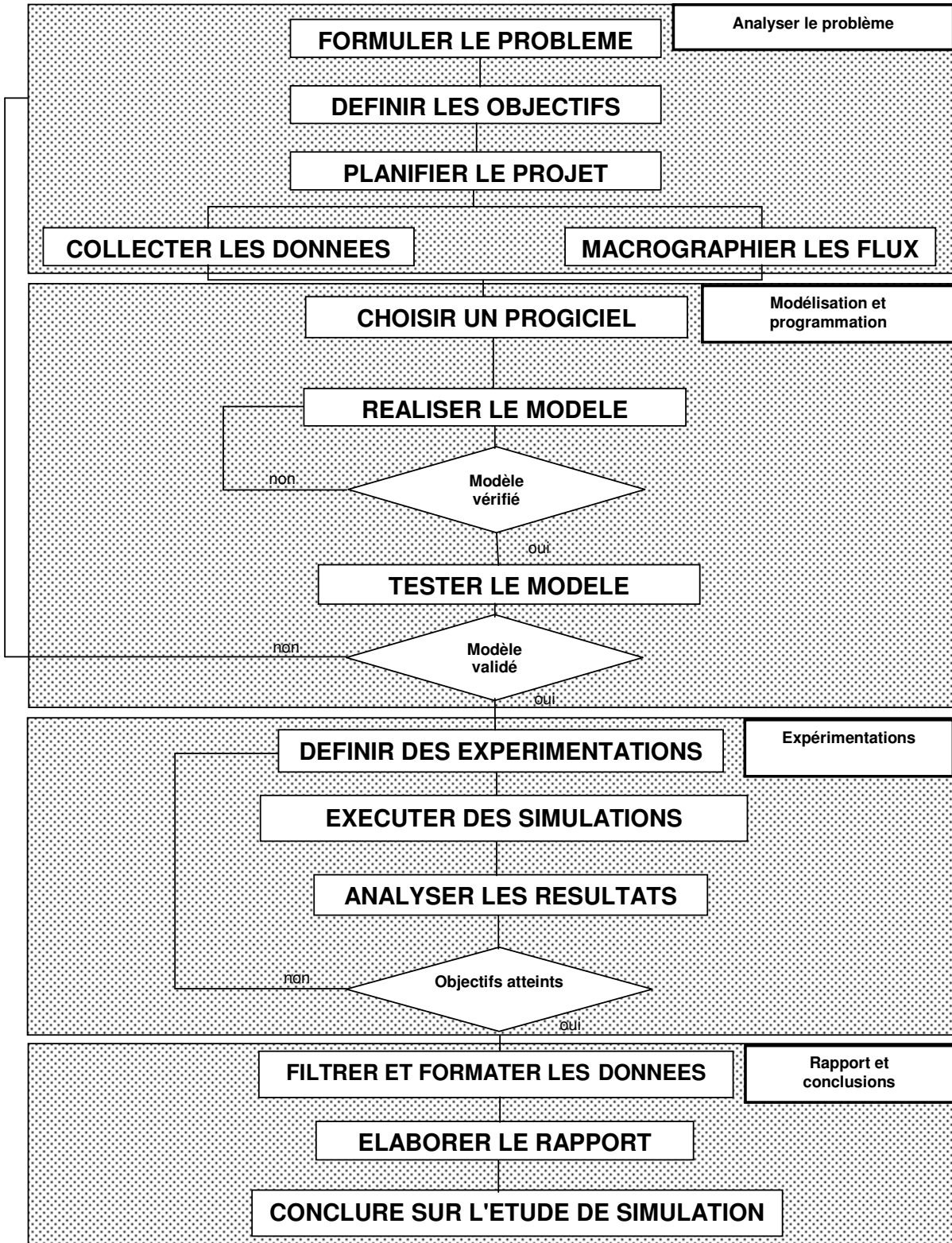


Figure 12 : Organigramme général de la méthodologie

## V- Approfondissement de la démarche de modélisation

Dans le chapitre précédent, une méthodologie générale de conduite d'un projet de simulation a été présentée. Si les étapes d'*Analyse du problème*, d'*Expérimentations* et de *Conclusions* ne présentent pas de difficultés particulières, il n'en est pas de même pour l'étape de *Modélisation*. Bien qu'il ait été dit que la construction du modèle soit de plus en plus facilitée par l'évolution des progiciels, le concepteur d'un modèle de simulation de flux peut difficilement passer directement du système réel, existant ou à concevoir, au modèle informatique. Un certain nombre d'étapes intermédiaires sont nécessaires pour mener à bien la construction du modèle.

Les travaux de [QUERE 97] et de [HAMAIDI 97] démontrent le souci d'approfondir la démarche de conception d'un modèle, en découpant cette conception en plusieurs sous-modèles.

Le travail de [HAMAIDI 97], inspiré de la modélisation d'entreprise IDEF3 et CIMOSA [VERNADAT 96], privilégie une approche multi-modèles, qui décompose le modèle global de l'atelier en trois sous-modèles :

- *Le modèle des flux* : il décrit la circulation des flux physiques et informationnels dans le système de production.
- *Le modèle du système physique* : il décrit la géométrie du système physique et représente les ressources du système de production ainsi que leur capacité et leur localisation dans l'espace.
- *Le modèle de conduite* : il décrit les lois de commande et les règles d'allocation des ressources du système physique aux tâches en cours d'exécution.

La méthodologie présentée par [QUERE 97] décompose le processus de modélisation en quatre phases consécutives et éventuellement itératives (figure 13) :

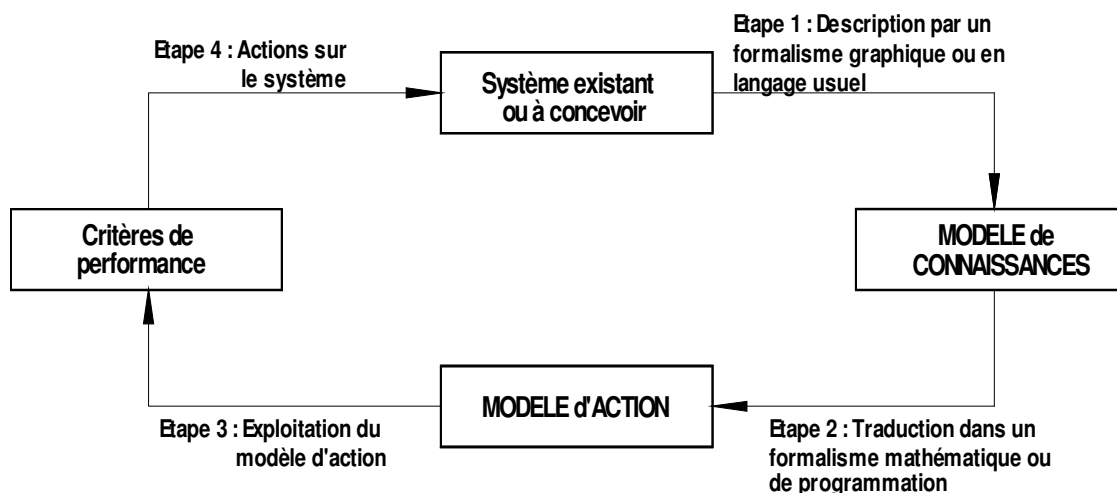


Figure 13 : Processus de modélisation



Cette méthodologie axée sur la modélisation est assez proche de la démarche générale présentée dans le chapitre IV et sur la figure 12. L'aspect qui semble important ici est de passer par un modèle intermédiaire de connaissances, dans un formalisme graphique par exemple, avant de passer au modèle d'action qui est traduit dans le langage du progiciel utilisé.

#### □ V.1- Objectifs d'un Modèle Graphique de Connaissances

La contribution qui peut être apportée aux idées présentées dans les deux travaux précédents est de créer un *Modèle Graphique de Connaissances (M.G.C)*, préliminaire à la modélisation informatique, sur lequel apparaît à la fois le modèle des flux et le modèle de conduite (le modèle géométrique pouvant être superposé au modèle des flux ou présenté séparément).

Les objectifs d'un tel modèle sont multiples :

- Structurer et rassembler les données utiles à la construction du modèle informatique.
- Servir d'outil de communication entre les différents acteurs (opérateurs, techniciens de maintenance, ingénieurs, responsables, ...) à la fois pour la conception d'un système de production mais aussi pour son exploitation.
- Permettre de représenter aussi bien les flux physiques qu'informationnels.
- Identifier et définir les règles et lois utiles au pilotage du système.
- Servir de support à la réalisation du modèle informatique.

L'une des caractéristiques essentielles de ce modèle est de devoir être construit à partir d'objets graphiques symbolisant les éléments du système réel.

Avant de présenter le formalisme graphique proposé pour ce modèle, un résumé des formalismes déjà utilisés dans l'industrie ou développés dans des travaux de recherche est abordé dans le chapitre suivant.

□ V.2- Etat de l'art et pratiques industrielles sur les modèles graphiques

**V.2-a) Analyse de déroulement**

Ce formalisme est très utilisé dans l'industrie, en tant que complément graphique à une gamme ou pour décrire un processus de production. Il permet d'analyser l'enchaînement des actions qui composent un processus. Ces actions sont décomposées en :

- **OPERATIONS**, destinées à modifier les caractéristiques de la matière.

*Exemple d'opérations : usinage, formage, assemblage, etc....*

Les opérations d'un processus de production industrielle font presque toujours appel à des machines qui peuvent être automatisées ou pas.

- **TRANSFERTS**, destinés à modifier la localisation de la matière.

- **STOCKAGES** , destinés à laisser s'écouler le temps sans agir sur les caractéristiques ni sur la localisation de la matière.

- **CONTROLES**, destinés à contrôler la qualité du produit, généralement par comparaison ou par mesurage,

- **ATTENTES**, destinées à découpler les opérations qui ont des temps opératoires différents.

Des symboles, plus ou moins conventionnels, sont utilisés pour permettre une visualisation de ces différentes actions (figure 14).






<b>Opération</b>	
<b>Transfert</b>	
<b>Stockage</b>	
<b>Contrôle</b>	
<b>Attente</b>	

Figure 14 : Symboles d'une analyse de déroulement

La liaison de ces différents symboles permet d'obtenir un graphique des flux. La figure 15 est un exemple de l'utilisation de ce formalisme.

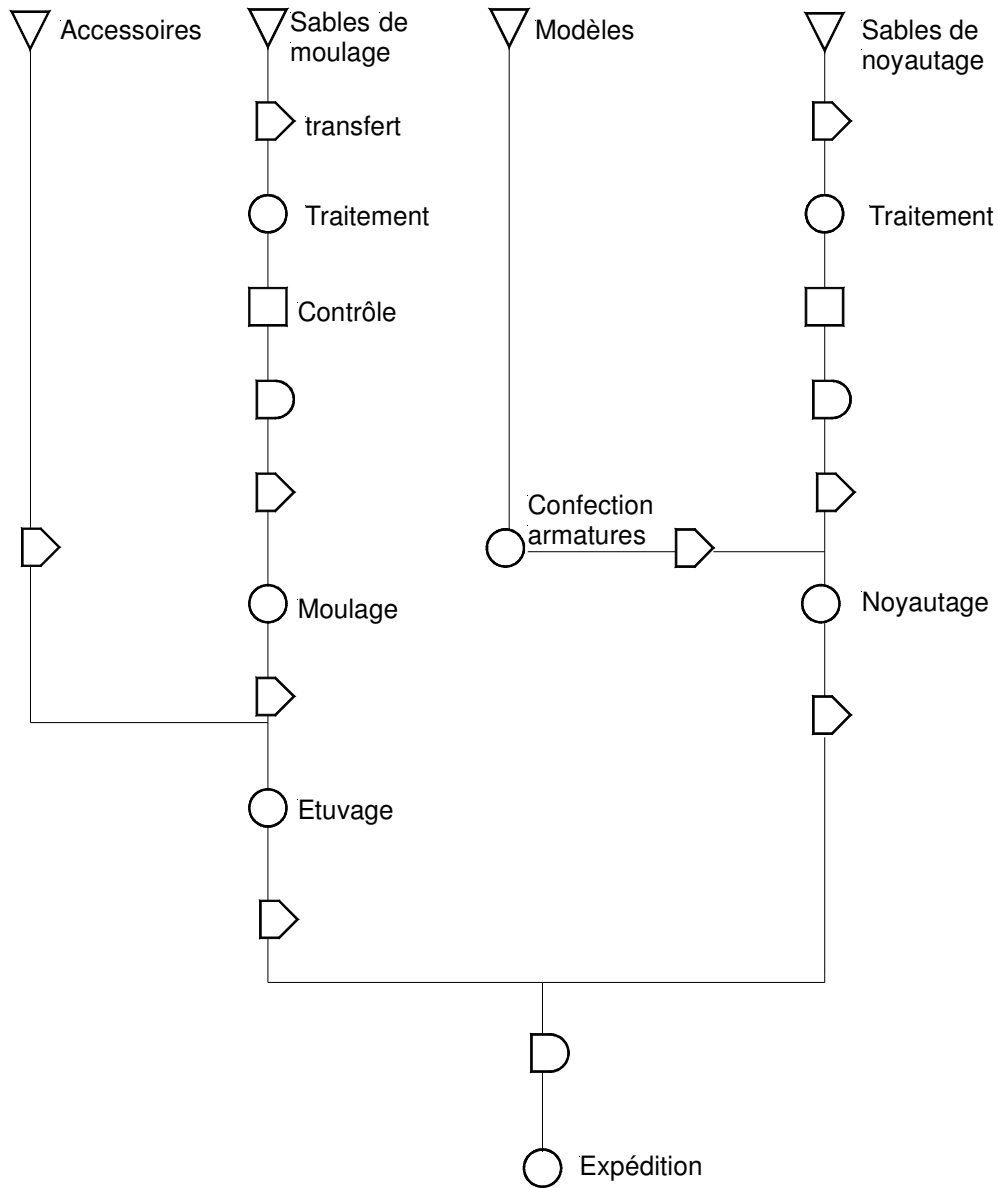


Figure 15 : Exemple d'analyse de déroulement

Un autre forme rencontrée est la matrice de déroulement qui permet de rassembler des informations quantitatives en plus des actions du processus (figure 16).

▽	▹	○	◐	□	Distance	Temps	Quantité	Poids	Déroulement
●									Sortie magasin matière
	●				70 m	0,3 h	150	300 kg	vers sciage
		●				0,05 h/p			Sciage
			●			1,4 h			Attente stabilisation
	●				25 m	0,12 h	150	300 kg	vers fraisage
		●				0,08 h/p			Fraisage
			●		200 m	0,9 h	100	200 kg	vers MMT
				●		0,5 h/p			Mesurage
	●				50 m	0,25 h	100	200 kg	vers montage

Figure 16 : Exemple de matrice de déroulement

Ce formalisme présente les avantages d'être très répandu dans l'industrie, d'utiliser des symboles simples à mémoriser et d'un niveau de détail pas trop important, de mettre en évidence les actions qui ne correspondent pas à de la valeur ajoutée (toutes celles qui ne sont pas des *OPERATIONS*). On obtient un modèle graphique synthétique et général des flux physiques.

Parmi les inconvénients, on peut justement regretter de ne pas voir apparaître les flux informationnels. D'autres part, ce modèle est trop général et ne regroupe pas toutes les données et règles utiles à la construction du modèle informatique.

### V.2-b) Travaux de recherche

La thèse de [PARIS 93] propose le développement d'un formalisme à partir des travaux de [BOURRIERES 90] et [BARAKAT 91]. Ceux-ci utilisent quatre symboles de base pour la réalisation d'un schéma opérationnel (figure 17).

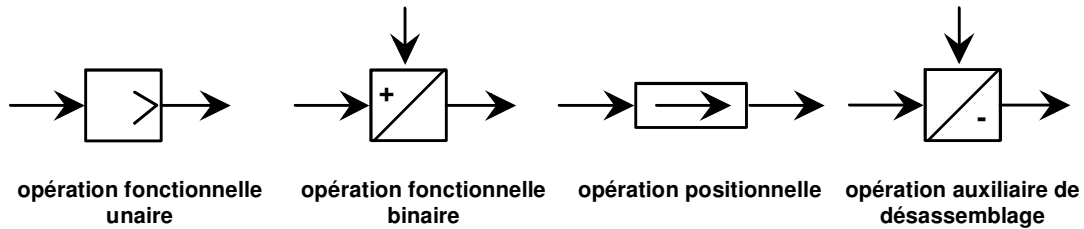


Figure 17 : Les quatre symboles de base de [BOURRIERES 90]

La figure 18 montre l'utilisation de ce formalisme pour représenter un processus d'assemblage.

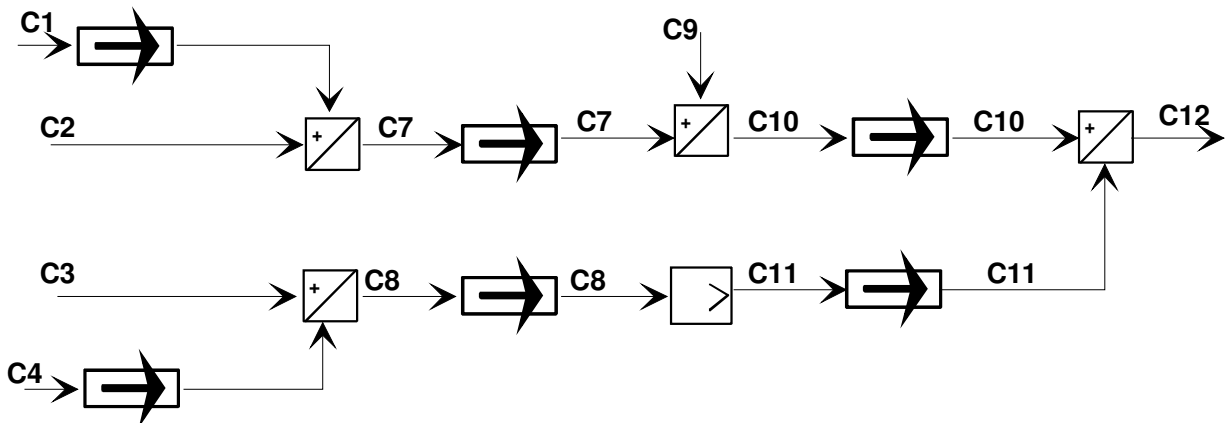


Figure 18 : Exemple d'un processus d'assemblage

A partir de ce formalisme, [PARIS 93] propose une extension destinée aux lignes d'assemblage automatisées, avec un système de convoyeurs. La figure 19 présente les principaux symboles de ce formalisme, et la figure 20 représente une application similaire à celle du système expérimental qui sert de support à nos travaux de recherche.

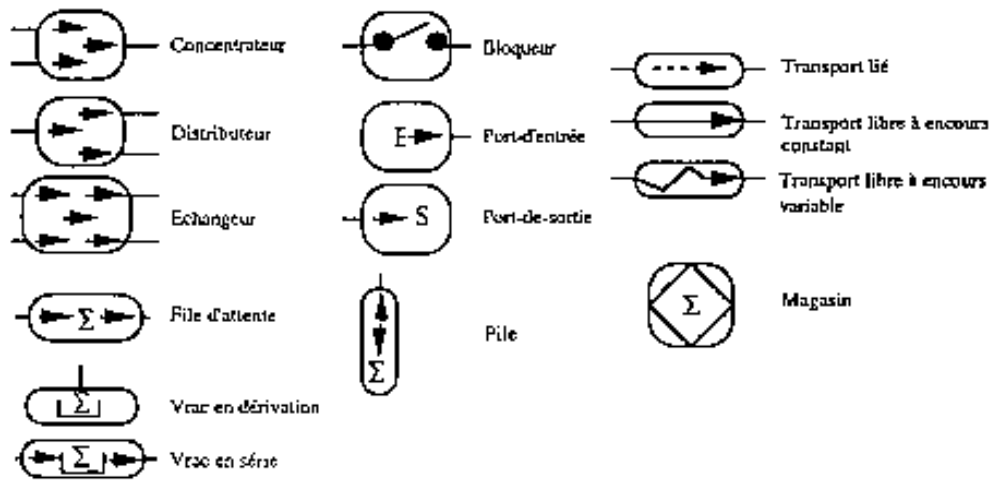


Figure 19 : Les symboles de base de [PARIS 93]

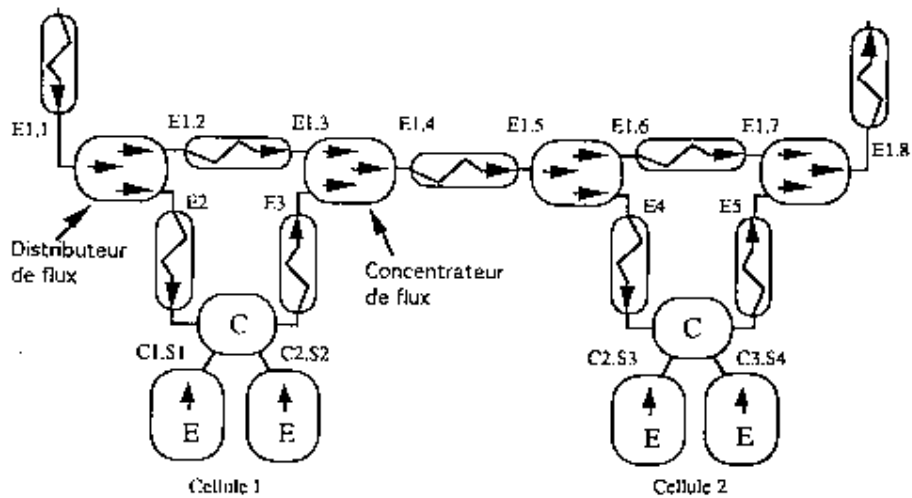


Figure 20 : Exemple de modélisation d'une ligne avec 2 postes en dérivation

Ce formalisme est d'une précision beaucoup plus importante que celui utilisé pour l'analyse de déroulement. D'autre part, il est d'une compréhension facile et d'une similitude assez proche avec les éléments réels qui composent le système de production. On dispose de beaucoup de détails sur le sous-système physique, mais par contre on n'a aucune information sur les sous-systèmes logiques et décisionnels.

Parmi les autres formalismes rencontrés dans la littérature, l'un d'eux est particulièrement prisé par les chercheurs. Il s'agit des Réseaux de Petri (RdP), pour lesquels les travaux et applications sont très nombreux. Dans le domaine de la production, l'ouvrage de [PROTH

95] présente les différentes utilisations des Réseaux de Pétri pour la conception et la gestion des systèmes de production.

Le formalisme des RdP utilise uniquement 3 symboles de base (figure 21) :

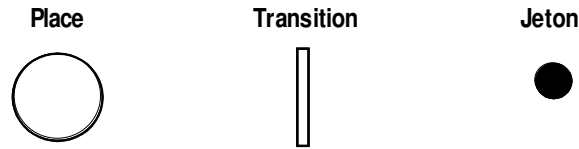


Figure 21 : Les trois symboles de base des RdP

Le fonctionnement des RdP est basé sur une dynamique qui autorise le franchissement des transitions sous certaines conditions de présence de jetons dans les places d'entrée.

La figure 22 présente une modélisation d'une ligne d'assemblage avec les RdP [PROTH 95].

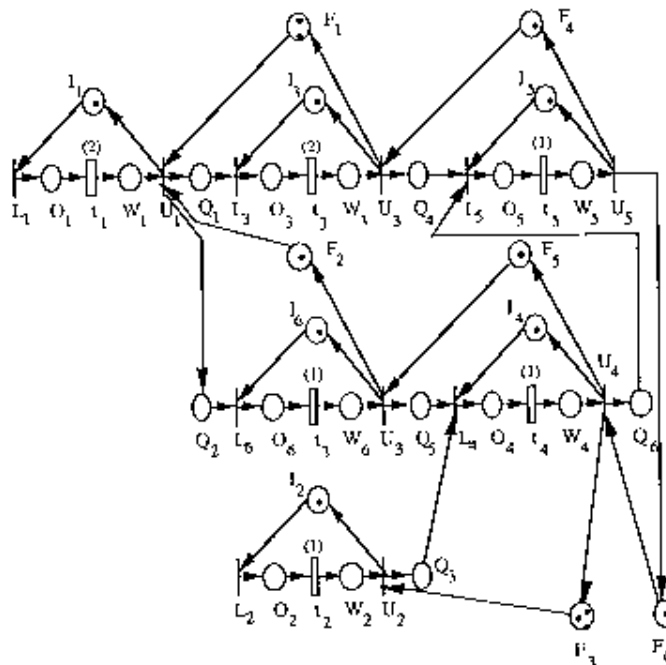


Figure 22 : Exemple de modélisation d'une ligne d'assemblage

La puissance de ce formalisme n'est plus à démontrer, notamment pour la description des règles de pilotage. Par rapport au problème que l'on s'est posé, le reproche que l'on peut lui faire est d'être d'un niveau d'abstraction trop important, notamment pour répondre à

l'objectif de communication entre les différents acteurs. D'autre part, un modèle en Réseaux de Pétri est encore trop éloigné du modèle informatique et si cette modélisation était utilisée, il faudrait sûrement encore une étape intermédiaire avant de passer au modèle d'action.

D'autres formalismes sont encore rencontrés pour la simulation de flux, et notamment les diagrammes d'action ou actigrammes [HAMAIDI 97]. Mais aucun ne répond à tous les objectifs que l'on s'est fixé dans le chapitre V.1.

Pour cette raison, nous allons présenter dans le chapitre suivant un formalisme issu de plusieurs travaux auxquels nous avons apporté des éléments permettant de l'utiliser comme Modèle Graphique de Connaissances.

### □ V.3- Proposition d'un Modèle Graphique de Connaissances

Le livre de [de ROSNAY 75] et le formalisme proposé par [JULIEN 92] sont à la base de ce travail. On rappelle que l'objectif est de disposer d'un modèle graphique de connaissances servant d'interface entre le système réel et le modèle informatique.

L'un des apports de ce travail est d'assimiler les éléments utilisés dans une simulation de flux (voir chapitre I.3) à des objets génériques, disposant d'attributs et capables de réaliser des opérations (figure 23). Les trois objets de base que l'on utilisera dans les simulations à événements discrets sont les Machines, les Stocks et les Convoyeurs. Ces trois objets sont utilisés pour agir sur un autre objet qui correspond aux Articles.

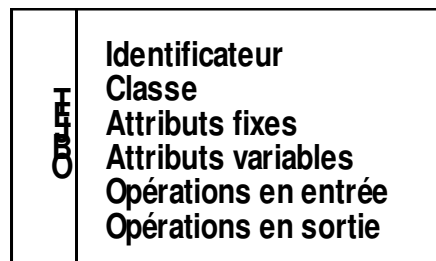


Figure 23 : Format des objets de base



Les symboles graphiques utilisés permettent non seulement de représenter les objets, mais aussi le flux physique et le flux informationnel (figure 24) :

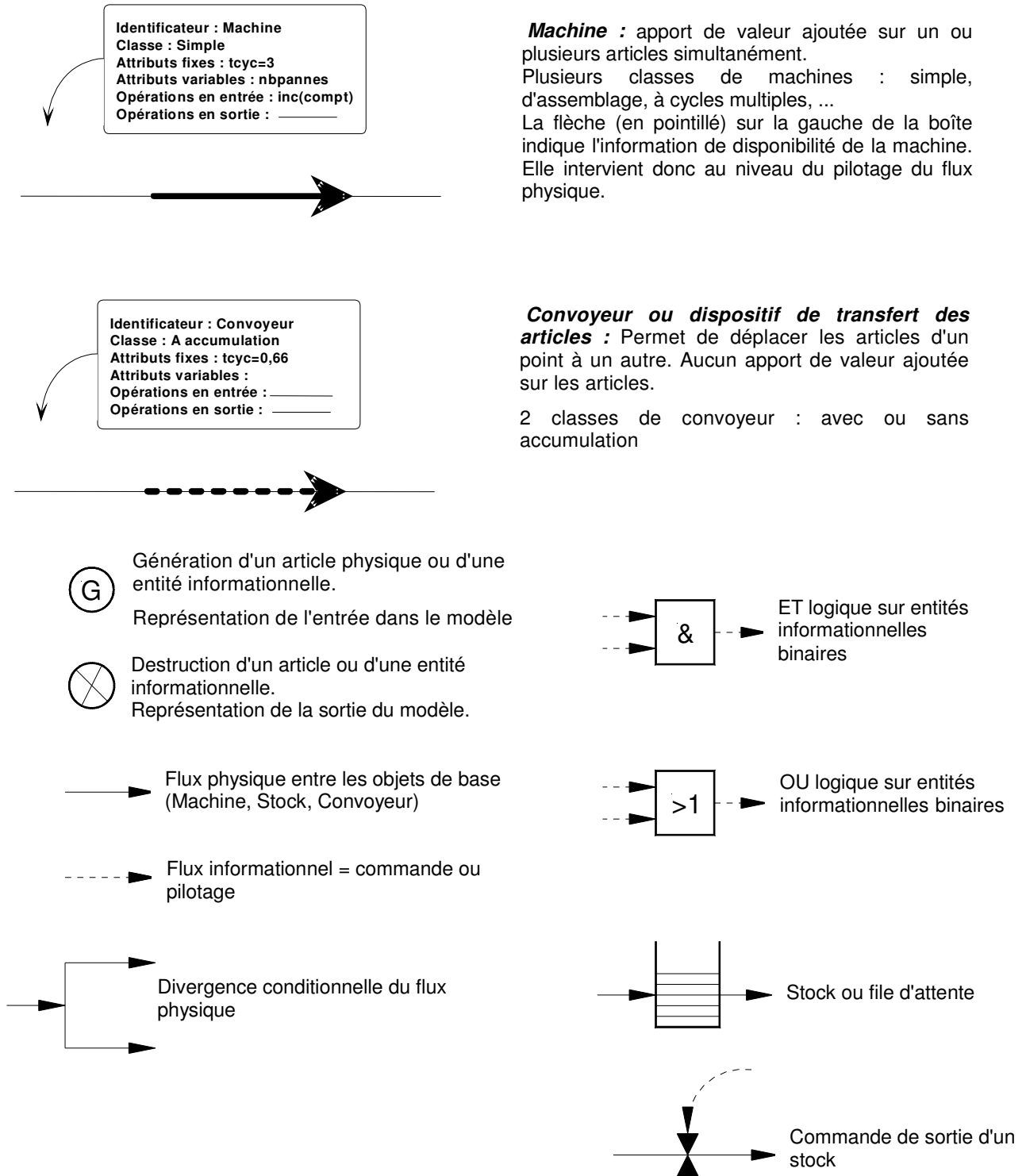
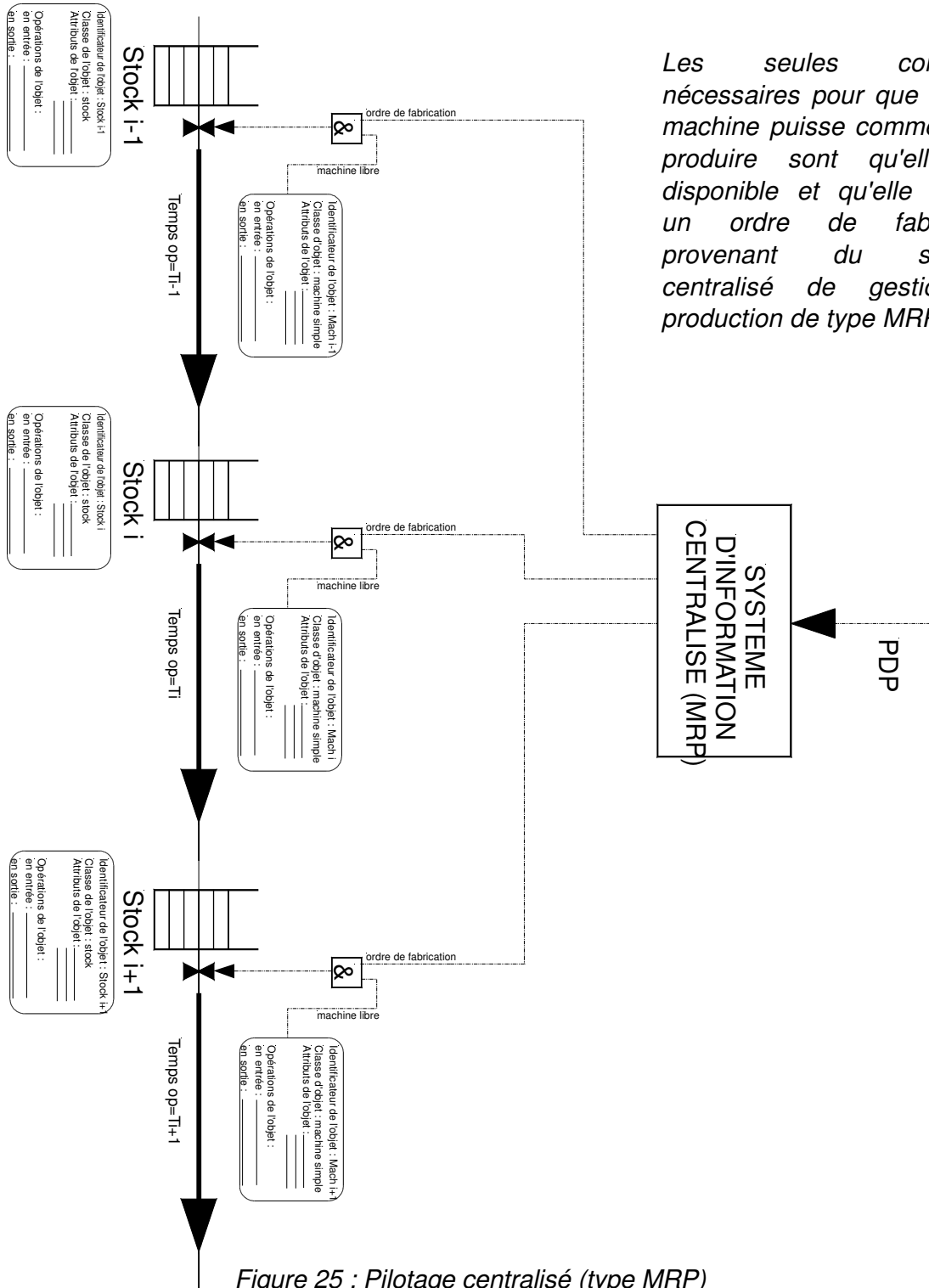


Figure 24 : Symboles graphiques utilisés

Les figures 25 à 26 présentent les Modèles Graphiques de Connaissances obtenus avec ce formalisme, appliqués aux modes de pilotage des flux (Partie 1 chapitre IV).



Les seules conditions nécessaires pour que chaque machine puisse commencer à produire sont qu'elle soit disponible et qu'elle reçoive un ordre de fabrication provenant du système centralisé de gestion de production de type MRP.

Figure 25 : Pilotage centralisé (type MRP)

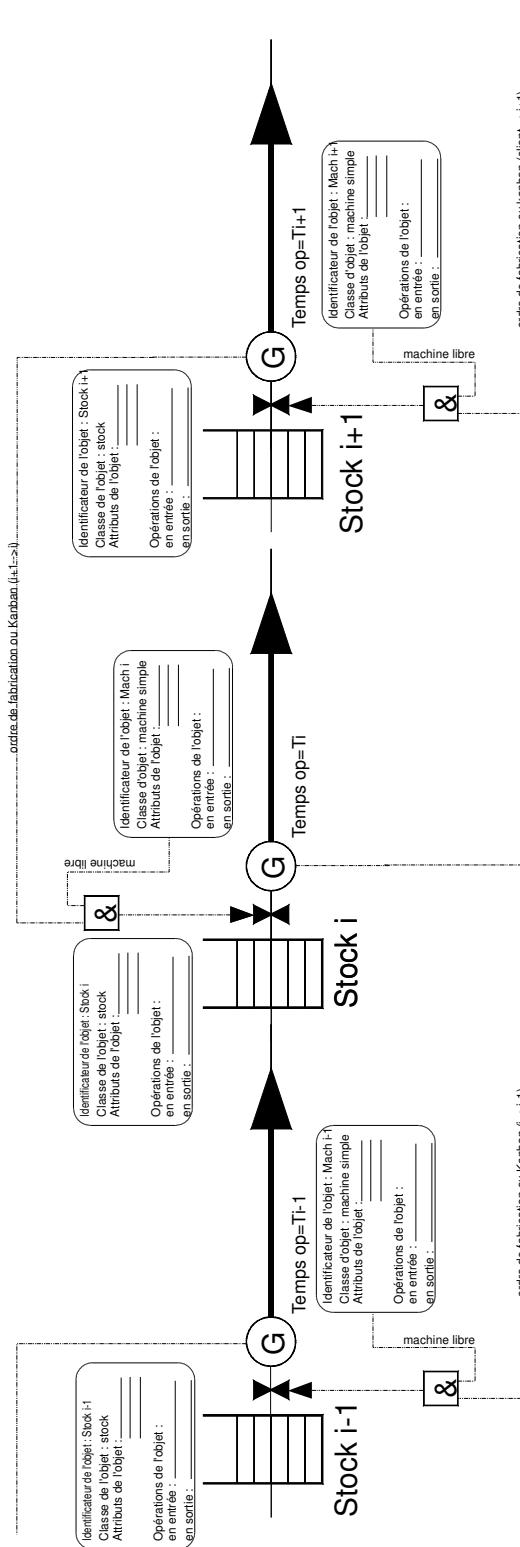


Figure 26 : Pilotage par l'aval et décentralisé (type Kanban)

Contrairement au pilotage centralisé, les conditions nécessaires pour qu'une machine travaille sont qu'elle soit disponible et que la machine située en aval ait "consommé" un article. La consommation d'un article par la machine "client" déclenche donc, sous la forme d'une étiquette appelé Kanban par les Japonais, un ordre de fabrication de la machine amont. Si la machine aval ("client") ne travaille pas, la machine "fournisseur" ne peut plus travailler, car elle ne reçoit plus d'ordre de fabrication, et cela même si elle est disponible. Ce mode de pilotage a principalement pour effet de limiter les encours entre chaque machine.

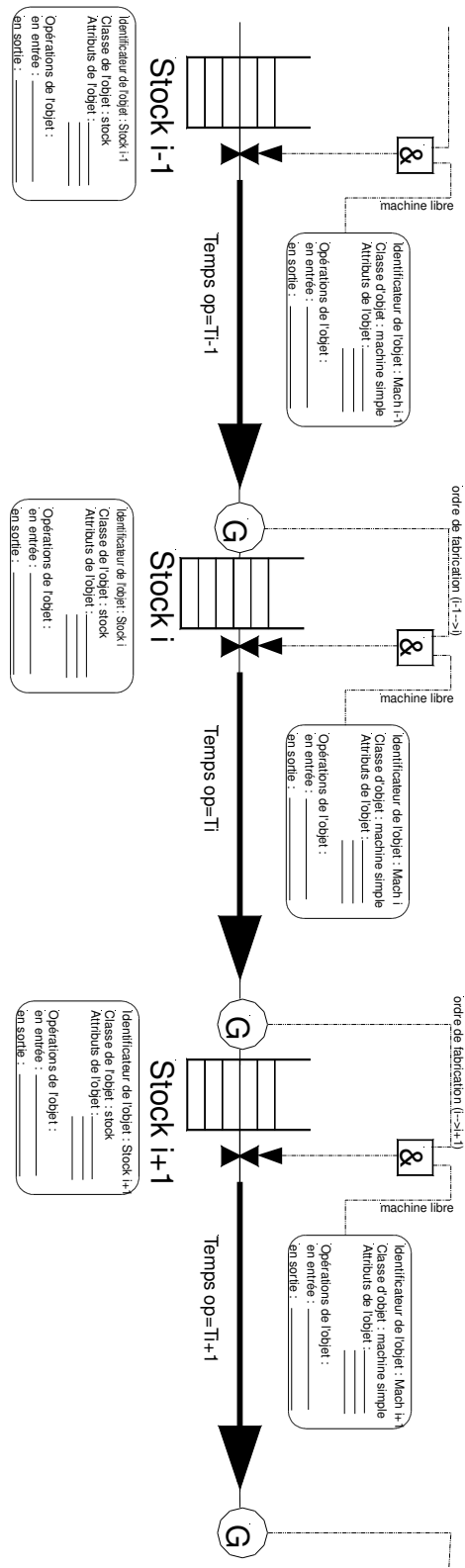


Figure 27 : Pilotage par l'amont et décentralisé

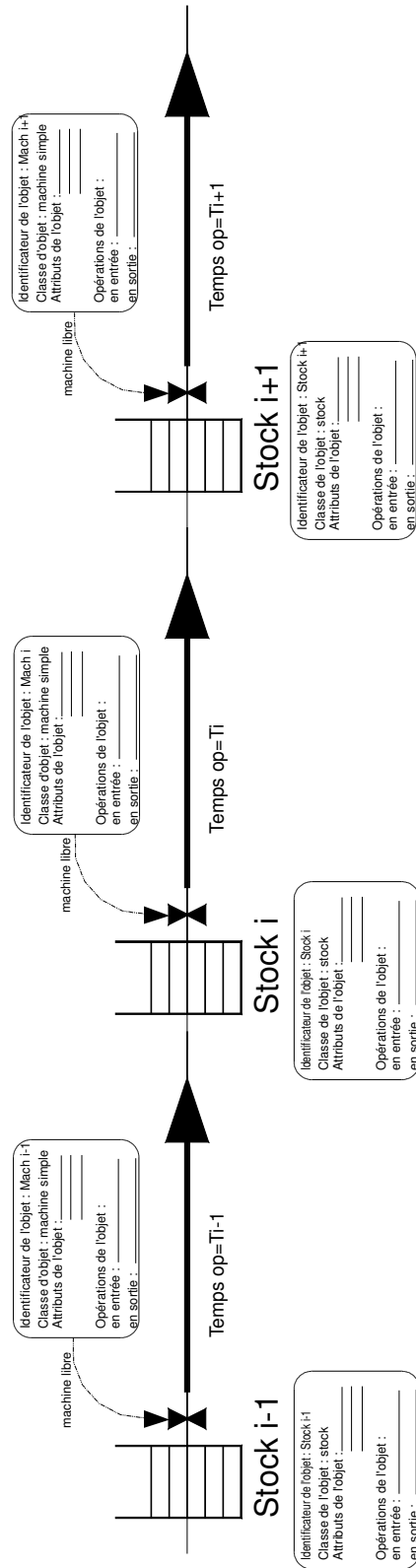


Figure 28 : Pilotage synchronisé

Comme on peut le voir sur ces différents exemples, le Modèle Graphique des Connaissances est très imagé par rapport au système réel. On retrouve, sur le même modèle, à la fois une modélisation du flux physique, du flux informationnel, des données utiles à la simulation et le modèle de conduite peut s'y superposer. Sa représentation est suffisamment simple et claire pour pouvoir servir de document de travail à tous les acteurs d'une simulation. La figure 30 montre un autre exemple de Modèle Graphique des Connaissances, le modèle géométrique du système physique est donné (figure 29) pour permettre de visualiser l'implantation des différents éléments.

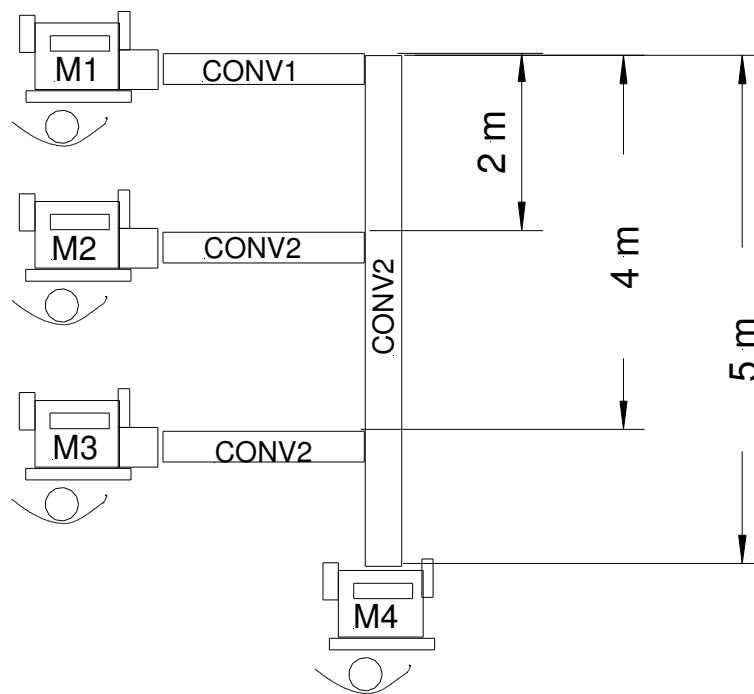


Figure 29 : Modèle géométrique (implantation des éléments)

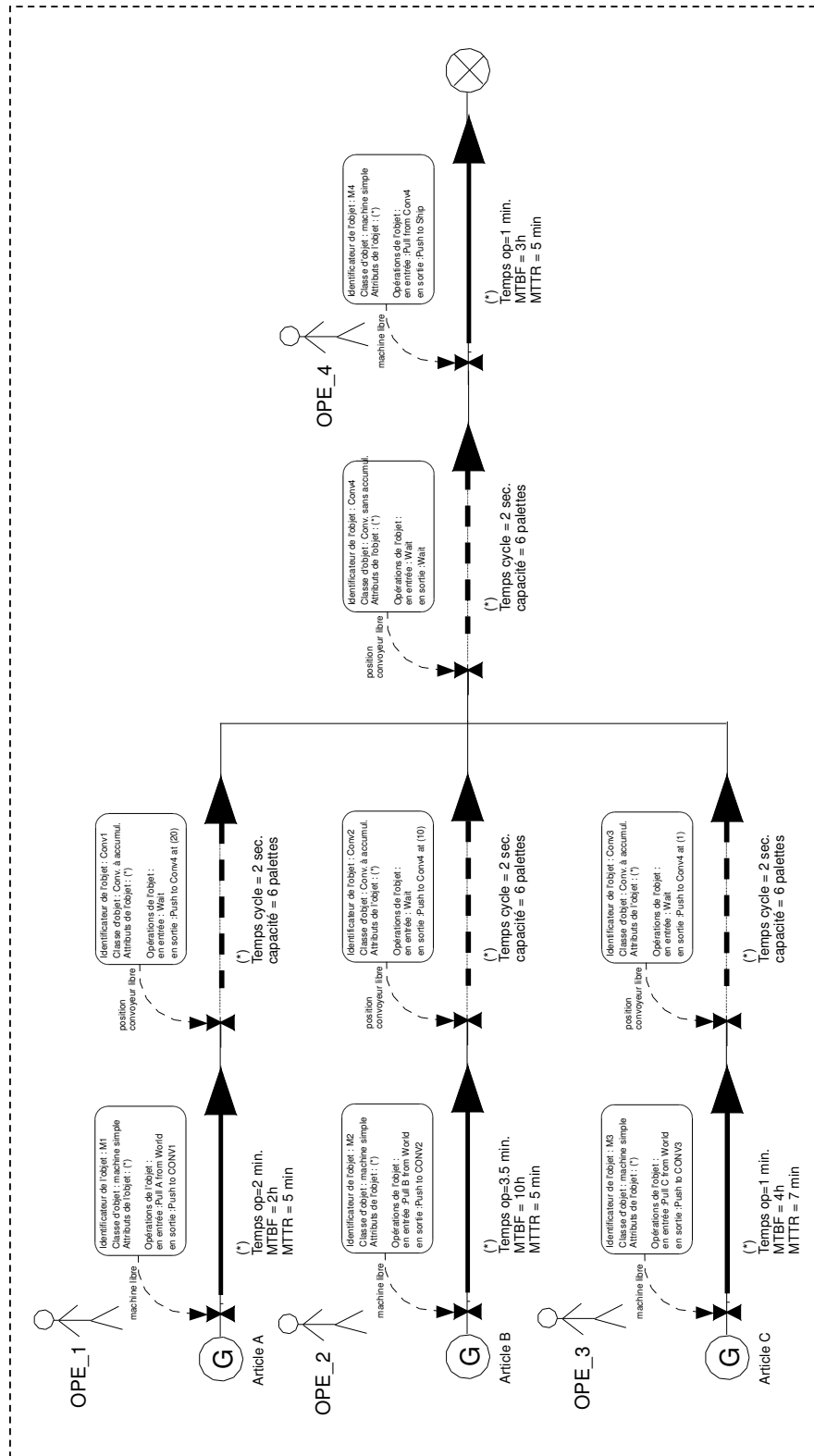


Figure 30 : Modèle Graphique de Connaissances

Le Modèle Graphique de Connaissances du système expérimental est présenté avec ce formalisme dans le chapitre suivant.

## VI- Implémentation du modèle du système expérimental

### □ VI.1- Modèle géométrique du système physique

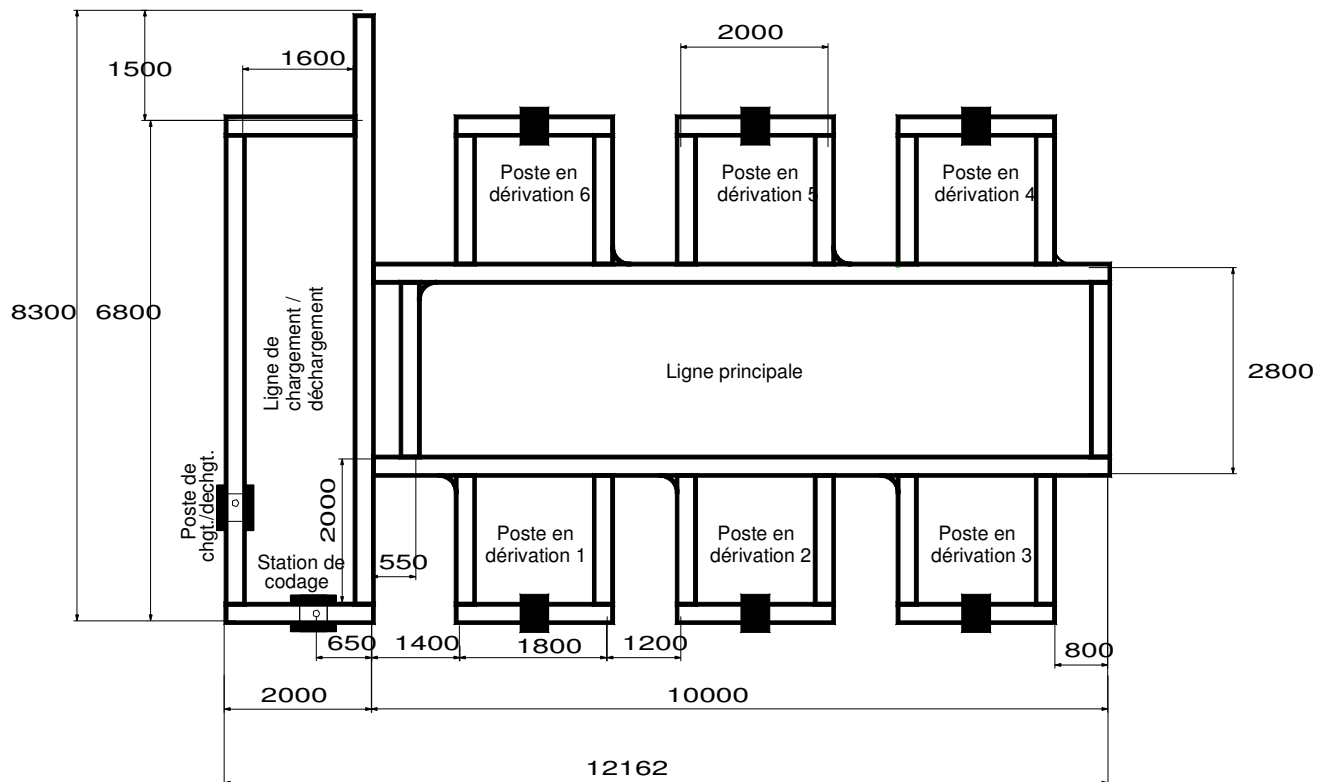


Figure 31 : Modèle géométrique du système expérimental



## □ VI.2- Modèle Graphique de Connaissances

L'élément fonctionnel le plus significatif sur cette ligne expérimentale est le poste en dérivation, que l'on retrouve six fois à l'identique (voir partie 3 "Système expérimental"). C'est donc le Modèle Graphique de Connaissances d'un poste en dérivation qui va être détaillé, sachant que sa représentation est identique pour l'ensemble des postes en dérivation de la ligne. Avant de passer à cette modélisation, il est utile de représenter le modèle géométrique d'un poste en dérivation seul, pour préciser quelles en sont les limites physiques (figure 32).

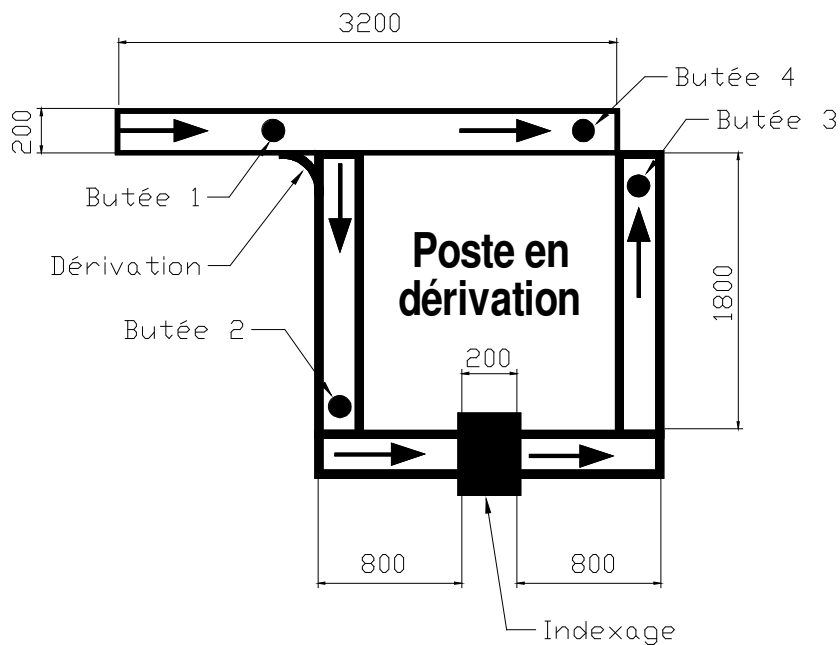


Figure 32 : Modèle géométrique d'un poste en dérivation

On rappelle que l'objectif du Modèle Graphique de Connaissances est de disposer d'un document sur lequel toutes les données nécessaires à la réalisation du modèle informatique de simulation sont réunies.

L'une des premières étapes de la réalisation de ce modèle est l'identification des objets. Cette étape nécessite une analyse du système réel qui va permettre au concepteur du modèle de "filtrer" les éléments physiques réels pour passer aux objets du modèle graphique. Il est donc important dans cette étape de décider quels sont les éléments qui

doivent être modélisés, et avec quel niveau de précision. Malgré tout, comme cela a déjà été montré, ce processus de réalisation du modèle peut être itératif, avec d'abord un dégrossissage, puis un affinage progressif de la modélisation.

Pour le modèle d'un poste en dérivation, les objets identifiés lors de cette étape sont les suivants :

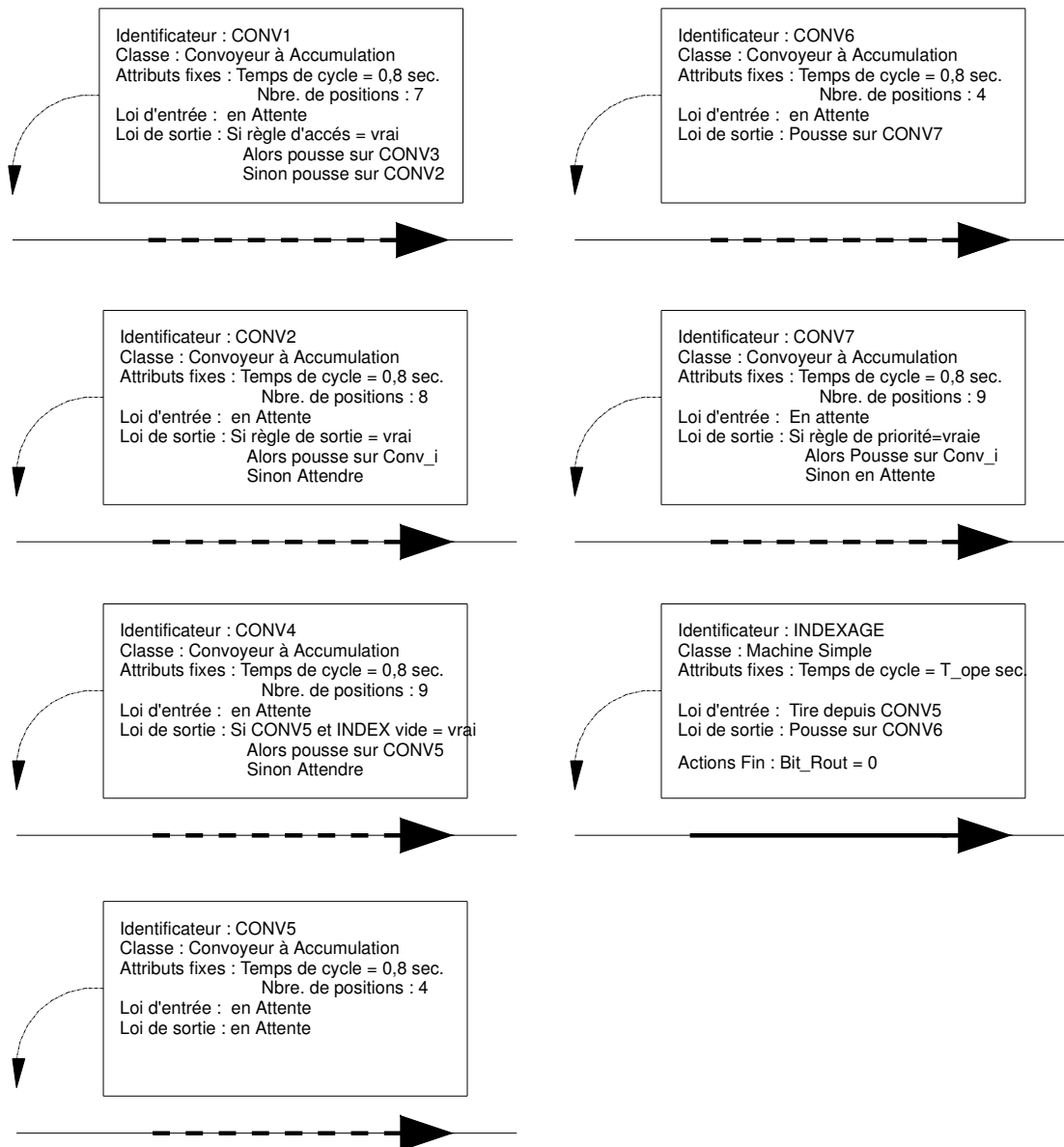


Figure 33 : Objets du modèle de connaissance d'un poste en dérivation

Les objets de base qui sont retenus pour la réalisation du modèle sont essentiellement des convoyeurs à accumulation et une machine (pour modéliser l'indexage). Une des simplifications de cette étape est de ne pas modéliser les butées parce qu'elles ne semblent pas intervenir de façon significative dans le fonctionnement général d'un poste en dérivation. Si l'on avait choisi de les modéliser, on aurait utilisé un objet de classe "Machine" pour le faire. Autre simplification, le tronçon de convoyeur de la ligne principale ( long. 3200) est divisé en deux convoyeurs CONV1 et CONV2, car les lois d'entrée et de sortie sont actives uniquement aux extrémités des convoyeurs.

La figure 34 présente le Modèle Graphique de Connaissances d'un poste en dérivation.

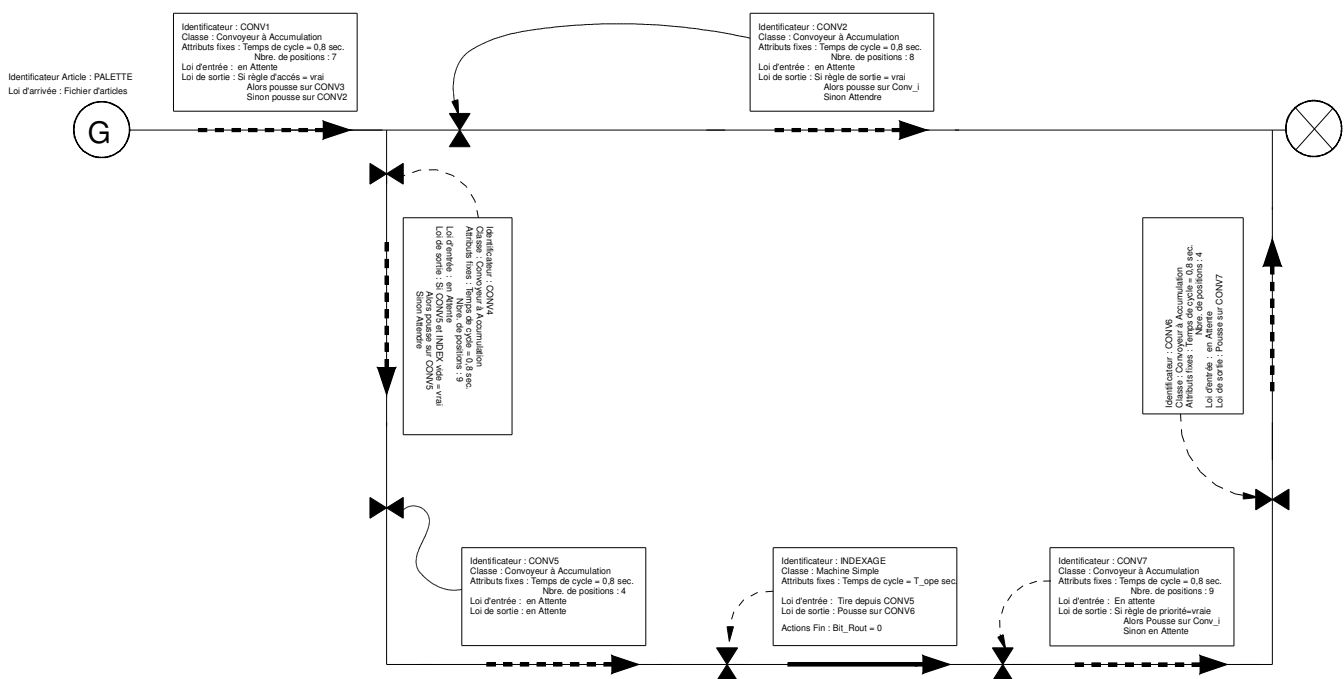


Figure 34 : Modèle Graphique de Connaissances d'un poste en dérivation

### □ VI.3- Modèle d'action

Le codage du modèle d'action est réalisé avec le progiciel WITNESS 9™ [LANNER 98]. Le principal intérêt de ce progiciel est de disposer d'une interface graphique de programmation et de visualisation dynamique (voir les figures 35 et 36). D'autre part, il a été choisi parce qu'il peut échanger des données de type objet (au sens de la programmation orientée objet) par le biais des liens O.L.E Automation de Microsoft (Object Linked Embedding) avec d'autres applications fonctionnant sous Windows 95™.

Cette fonctionnalité est utilisée principalement dans la partie "Choix et intégration d'un outil d'optimisation" (voir Partie 8) .

L'implémentation du modèle informatique est obtenu avec un minimum de programmation, mais à partir de la déclaration et de la description sous forme interactive des différents objets du modèle. Toutefois, seule la programmation des règles du sous-modèles de pilotage nécessite l'utilisation d'un langage algorithmique interprété avec des primitives habituelles (IF..THEN..ELSE, FOR..TO..NEXT, WHILE.., etc...). Cette programmation est réalisée par des lois ou des actions d'entrée et de sortie au niveau des objets de type Machine, Convoyeur et Article. Les lois permettant de décrire le flux et les actions sont utilisées pour modifier ou accéder à des valeurs de variables logiques prédéfinies ou définies par l'utilisateur.

Malgré son interface conversationnelle, Witness génère automatiquement un code en langage WCL (Witness Command Language) qui permet d'avoir une trace écrite de la construction du modèle informatique. Une partie de ce code correspondant au Modèle Graphique de Connaissances est présentée sur la figure 37.

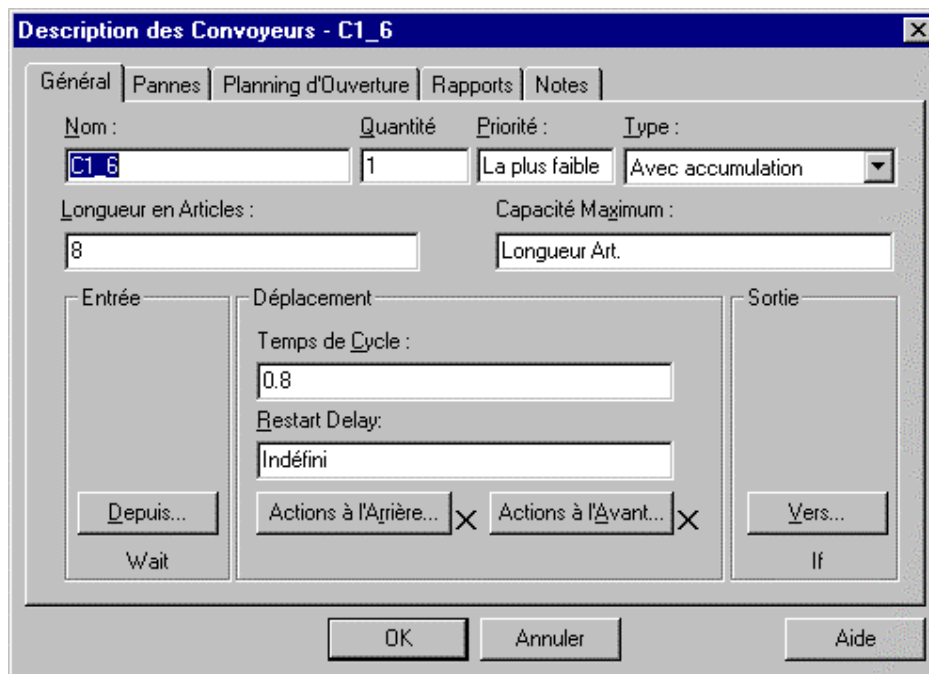


Figure 35 : Exemple d'une fenêtre de description d'un convoyeur

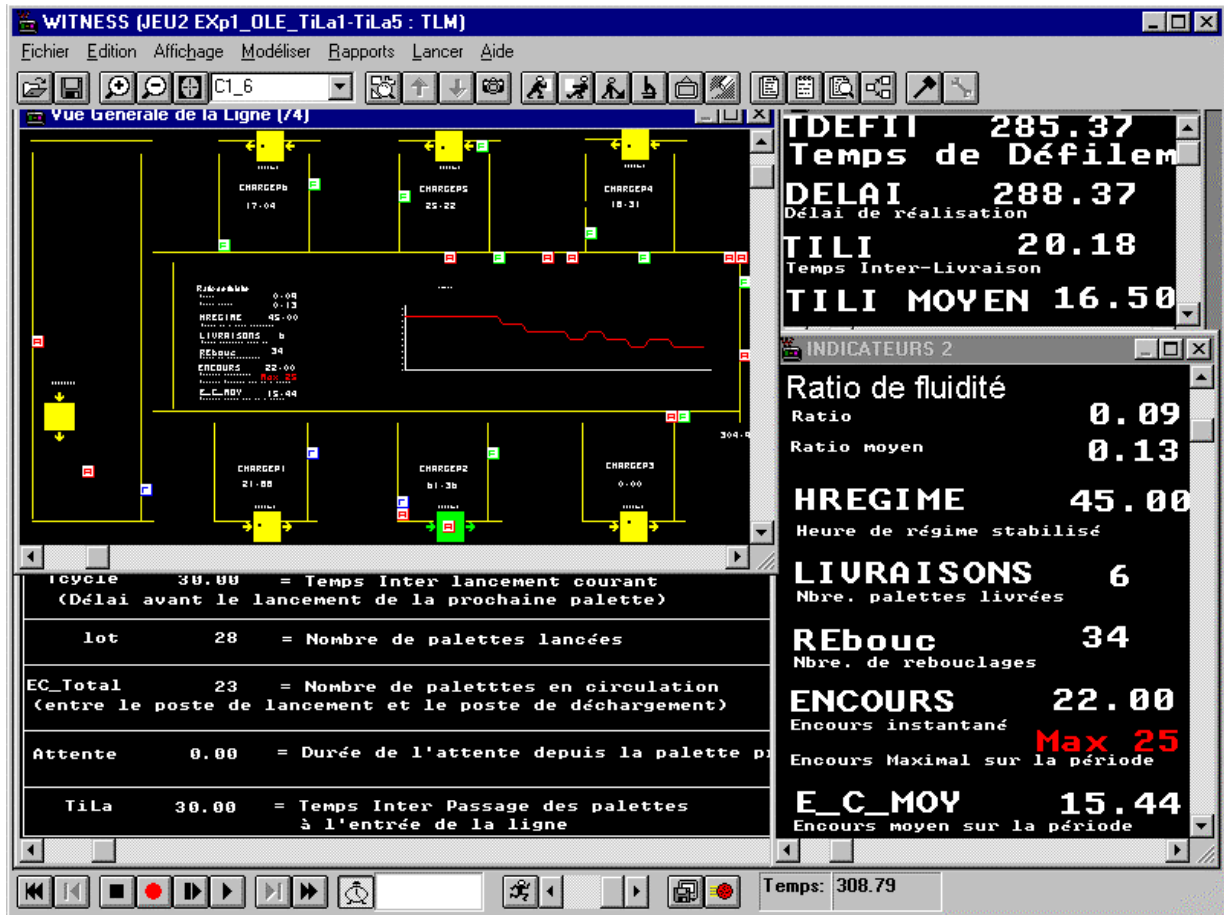


Figure 36 : Visualisation graphique et dynamique de la simulation

<p>NOM DE LA MACHINE: <b>INDEX_1</b>;</p> <p>TYPE: <b>Simple</b>;</p> <p>DESCRIPTION_REGLAGE</p> <p>Réglage n°: <b>1</b></p> <p>* Mode: <b>Changement Valeur</b>;</p> <p>* Expression: <b>ICON</b>;</p> <p>* Temps Réglage: <b>0.0</b>;</p> <p>* Description: <b>Réglage 1</b></p> <p>* Poste n°: <b>1</b>;</p> <p>ACTIONS, Début</p> <p>Début</p> <p><b>Sreg1 = Sreg1 + 1</b></p> <p>Fin Actions</p> <p>FIN DESCRIPTION_REGLAGE</p> <p>TEMPS DE CYCLE: <b>T_OPE (1)</b>;</p> <p>ACTIONS, Fin</p> <p>Début</p> <p><b>bit_rout (1) = 0</b></p> <p>!calcul charge</p> <p><b>CHARGE P1 = PUTIL (INDEX_1,2)</b></p> <p>!calcul de la charge totale en sec.</p> <p><b>STCYC1 = STCYC1 + T_OPE (1)</b></p> <p>Fin Actions</p> <p>LOI D'ENTREE: <b>PULL from C5_1 at Front</b>;</p> <p>LOI DE SORTIE: <b>PUSH to C6_1 at Rear</b>;</p> <p>FIN INDEX_1</p>	<p>NOM DU CONVOYEUR: <b>C1_1</b>;</p> <p>TYPE: <b>A_accumulation</b>;</p> <p>LONGUEUR ART.: <b>4</b>;</p> <p>CAPACITE MAX: <b>4</b>;</p> <p>LOI D'ENTREE: <b>Wait</b>;</p> <p>LOI DE SORTIE: <b>IF bit_rout (1) = 1 AND bit_def = 1 AND bit_ante = 1 AND NPARTS (C4_1) &lt; P1_AM</b></p> <p><b>PUSH to C4_1 at Rear</b></p> <p><b>ELSE</b></p> <p><b>PUSH to C2_1 at Rear</b></p> <p><b>ENDIF</b>;</p> <p>TEMPS DE CYCLE: <b>0.8</b>;</p> <p>PANNES: <b>Aucune</b>;</p> <p>FIN C1_1</p>
--	--

Figure 37 : Description d'objets en langage WCL

## Conclusion

Cette partie a permis de présenter la simulation de flux, outil informatique qui va être utilisé pour analyser et optimiser le fonctionnement de la ligne expérimentale. En effet, plutôt que de mener des expériences longues et coûteuses sur la ligne réelle, la simulation permet de réaliser les mêmes expériences, mais de façon virtuelle, sur un ordinateur, sans aucun risque et avec des temps de réponse très rapides. Cet outil nous permettra, dans les prochaines parties de ce travail, de tester un très grand nombre de paramètres et de valeurs de ces paramètres en un minimum de temps.

Bien sûr, avant de lancer des simulations, il est nécessaire de construire un modèle de simulation du système étudié. Dans cette partie, deux contributions sont apportées :

- La première est d'ordre méthodologique, et permet d'organiser en quatre macro-étapes, elles-mêmes décomposées en étapes, la réalisation d'une étude de simulation. Cette démarche est présentée de façon graphique sous la forme d'un organigramme.
- La deuxième est d'ordre analytique, puisqu'elle a pour but de proposer la construction d'un Modèle Graphique de Connaissances, préliminaire à la construction du modèle d'action, qui est lui directement lié au progiciel utilisé. L'objectif du Modèle Graphique de Connaissances est de réaliser une modélisation préalable en faisant apparaître les différentes données, de nature numérique ou logique, ainsi que la décomposition en objets de simulation : machines, convoyeurs, articles, stocks, etc... Ceci permet de créer un document de synthèse sur lequel seront rassemblées toutes les données utiles à la construction du modèle d'action. L'expérience prouve en effet que la construction d'un modèle nécessite la collecte et la synthèse d'informations issues de multiples sources. Le Modèle Graphique de Connaissances est donc un outil de synthèse et de communication entre les différents acteurs d'une étude de simulation.

Dans le chapitre VI, on présente la réalisation pratique du Modèle Graphique de Connaissances de la ligne expérimentale et du modèle d'action réalisé avec le progiciel WITNESS. Ce modèle d'action a été construit, puis vérifié et validé en le comparant au système réel. Dans la partie 5, nous allons donc définir les simulations qui seront réalisées avec ce modèle.