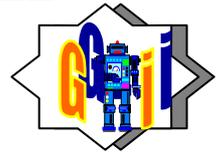




REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE  
MINISTERE DE L'ENSEIGNEMENT SUPERIEUR  
ET DE LA RECHERCHE SCIENTIFIQUE  
UNIVERSITE HADJ LAKHDAR « BATNA »  
FACULTE DES SCIENCES DE L'INGENIEUR  
DEPARTEMENT GENIE INDUSTRIEL  
LABORATOIRE D'AUTOMATIQUE ET PRODUCTIQUE



## MEMOIRE DE MAGISTER

PRESENTE AU

Laboratoire d'Automatique et Productive  
LAP

*En vue de l'obtention d'un diplôme de magister*

**Spécialité**

*Génie Industriel et Productive*

PAR

**MARREF Tarek**

**Ingénieur en Génie industriel**

*Thème:*

---

**Les indicateurs de performance un outil  
d'aide au contrôle et pilotage d'un  
système de production basé sur la  
simulation**

**Application à l'entreprise ERIAD BATNA**

---

Soutenu le : 02/07/2008, devant Le jury composé de :

L. H. Mouss	MC. Université de Batna	Président de jury
N. K. Mouss	MC. Université de Batna	Rapporteur
A. Dib	MC. Université d'Oum-el-bouaghi	Examineur
B. Abdelhadi	MC. Université de Batna	Examineur
A. Louchene	MC. Université de Batna	Examineur

# SOMMAIRE

<b>Introduction Générale</b>	I
<b>Introduction à la simulation</b>	
1.1 Introduction	01
1.2 La simulation	01
1.2.1 Définition de la simulation	01
1.2.2 Un modèle	01
1.3 La simulation et l'analyse	02
1.4 But de la simulation	03
1.4.1 Donner un aperçu du fonctionnement du système	03
1.4.2 Amélioration et développement des performances d'un système	03
1.4.3 Tester de nouveaux concepts	04
1.4.4 Récolter des informations sans perturber le système réel	04
1.5 Avantage de simulation	04
1.5.1 Conditions analytiques réduites	04
1.5.2 Expérimentation en temps réduit	05
1.5.3 Possibilité d'animation du modèle	05
1.6 Inconvénient de la simulation	05
1.6.1 La simulation ne peut pas donner des résultats précis quand les données d'entrée sont imprécises	05
1.6.2 La simulation ne peut pas fournir des réponses faciles aux problèmes complexes	06
1.6.3 La simulation, à elle seule, ne peut pas résoudre tous les problèmes	06
1.6.4 D'autres Considérations	06
1.7 Simulation et complexité de modélisation des systèmes manufacturiers	07
1.7.1 Complexité du système de prise de décision	07
1.7.2 Limites (faiblesses) des méthodes analytiques	08
1.8 Augmentation de la popularité de la simulation	09
1.9 Concept de base de la simulation	11
1.9.1 Les composant de base de la simulation	11
1.9.2 Liste des événements de la simulation	13
1.9.3 Mesure statistique de la performance	14
1.10 Conclusion	16
<b>Notion de pilotage industriel</b>	
2.1 Introduction	17
2.2 Le pilotage de production : pour quoi faire	17
2.3 L'entreprise-système	18
2.4 La fonction « pilotage » dans un système	19
2.5 Typologie des structures de pilotage	21
2.5.1 Caractérisation suivant l'existence ou non d'un ordonnancement prévisionnel	21
2.5.2 Caractérisation selon la structure de pilotage	23
2.6 Place de la prise de décision dans le pilotage	27
2.6.1 Prise en compte des contraintes	28
2.6.2 Une typologie de la décision dans le cadre du pilotage industriel	29
2.7 Le système d'indicateur pour le pilotage industriel	30
2.7.1 L'indicateur de performance	30
2.7.2 Les indicateurs dans le cadre du pilotage	32
2.8 Conclusion	33
<b>Pilotage par Simulation</b>	

3.1 Introduction	34
3.2 La Simulation en Gestion	34
1- Simulation de la chaîne logistique	35
2- Simulation dans la planification et l'établissement des programmes	35
3- Simulation et aide à la décision	36
3.3 Adopter la simulation comme un outil	39
3.3.1 <i>Le processus d'adoption</i>	39
3.3.2 <i>Facteurs de prise de décision</i>	39
3.3.3 <i>Capital de la connaissance</i>	40
3.4 Le pilotage par simulation	40
3.5 Conditions de succès de coopération entre pilotage et simulation	42
3.6 Démarche d'utilisation de la simulation pour pilotage	43
3.6.1 <i>Analyse du système à étudier et formulation du problème</i>	43
3.6.2 <i>Collecte des données nécessaires à la simulation</i>	43
3.6.3 <i>Construction du modèle de simulation</i>	44
3.6.4 <i>Vérification et validation du modèle</i>	44
3.6.5 <i>Définition des expériences à effectuer</i>	44
3.6.6 <i>Simulations et enregistrement des résultats</i>	44
3.6.7 <i>Evaluation des performances interprétation des résultats et recommandations</i>	44
3.6.8 <i>Mise en œuvre des plans d'action sur le système réel</i>	45
3.7 Conclusion	46
<b>Etude de Cas : application à l'entreprise ERIAD BATNA</b>	
4.1 Méthodologie de travail	47
4.2 Présentation de l'entreprise	48
4.2.1 <i>Historique</i>	48
4.2.2 <i>Effectif</i>	48
4.2.3 <i>Production de l'unité</i>	48
4.3 Processus de transformation du blé	49
4.4 Description du processus de transformation	51
4.4.1 <i>le Nettoyage</i>	51
4.4.2 <i>la Mouture</i>	52
4.4 Analyse du système de production	55
4.5 Modélisation du sous-système de fabrication de l'entreprise	57
4.5.1 <i>Modélisation de la partie Nettoyage</i>	57
4.5.2 <i>Modélisation de la partie Mouture</i>	60
4.6 Validation du modèle	62
4.7 Modélisation du système de pilotage par les réseaux STP-CP	65
4.7.1 <i>Formalisation des réseaux STP - CP</i>	65
4.7.2 <i>Modélisation du système physique</i>	67
4.7.3 <i>modélisation du système de pilotage</i>	69
4.7.3.1 <i>Description des centres de décision</i>	71
4.8 Simulation du processus de production	77
4.8.1. <i>La philosophie de SIMUL8 repose sur quelques principes de base</i>	77
4.8.2. <i>Les objets de base de SIMUL8</i>	77
4.8.3. <i>L'interface SIMUL8</i>	78
4.8.4. <i>Les objets utilisés dans SIMUL8</i>	79
4.9 Modèle de simulation du système de production	83
4.11 4.10 Rôle du TRS	88
4.10 Conclusion	95
<b>Conclusion Générale</b>	<b>III</b>

**Référence bibliographiques**  
**Liste des figures**  
**Liste des tableaux**

V  
VIII  
X

## LISTE DES FIGURES

<b>Figure 1.1</b> Croissance du besoin en performance du système, augmentation de la complexité et réduction du cycle de vie	08
<b>Figure 1.2</b> Les composants de base de la simulation	11
<b>Figure 1.3</b> Exemple de calcul du nombre moyen dans une file d'attente	15
<b>Figure 2.1</b> Le paradigme systémique [LeM 77]	18
<b>Figure 2.2</b> L'entreprise-système [L. BLANC]	19
<b>Figure 2.3</b> Fonction pilotage [TAT 87]	20
<b>Figure 2.4</b> Pilotage à ordonnancement prévisionnel partiel [Trentesaux 96]	22
<b>Figure 2.5</b> Pilotage à ordonnancement prévisionnel total [Trentesaux 96]	23
<b>Figure 2.6</b> Approche centralisée [Trentesaux 96]	24
<b>Figure 2.7</b> Approche hiérarchisée [Trentesaux 96]	25
<b>Figure 2.8</b> Approche coordonnée [Trentesaux 96]	25
<b>Figure 2.9</b> Approche hétérarchique [Trentesaux 02]	26
<b>Figure 2.11</b> Approche hybride [Trentesaux 02]	27
<b>Figure 2.12</b> Typologie de la décision dans le pilotage industriel	29
<b>Figure 2.13</b> La boucle de pilotage à travers l'indicateur [Clivillé 04]	30
<b>Figure 3.1</b> Conception par simulation	36
<b>Figure 3.2</b> Concept d'émulation	37
<b>Figure 3.3</b> Commande par simulation	38
<b>Figure 3.4</b> Mécanisme de transfert	38
<b>Figure 3.5</b> Le flux d'information sans la simulation [Randell et al, 2001]	41
<b>Figure 3.6</b> Le flux d'information avec la simulation [Randell et al, 2001]	41
<b>Figure 3.7</b> Estimation de la production avec et sans simulation	42
<b>Figure 3.8</b> Processus d'utilisation de la simulation [Claire 2000]	45
<b>Figure.4.1</b> Méthodologie de travail	47
<b>Figure.4.2.</b> La production de semoule et de la farine	49
<b>Figure.4.3</b> Secteurs d'une minoterie	50
<b>Figure.4.4</b> Cycle de fabrication	51
<b>Figure.4.5.</b> Processus de production, partie nettoyage	52
<b>Figure.4.6.</b> Processus de production, partie mouture	53
<b>Figure.4.6.</b> Schéma d'installation, partie mouture	54
<b>Figure.4.7.</b> Système de fabrication système de pilotage [habchi 01]	56
<b>Figure 4.8.</b> Modèle RdP du système de nettoyage	59
<b>Figure 4.9.</b> Modèle RdP Partie mouture	62
<b>Figure.4.10.</b> Comparaison entre la quantité réelle et la quantité donnée par simulation (Sirphyco) du nettoyage du blé avant mouillage	64
<b>Figure.4.11.</b> Comparaison entre la quantité réelle et la quantité donnée par simulation (Sirphyco) du nettoyage du blé après mouillage	64
<b>Figure.4.12.</b> Comparaison entre la quantité réelle et la quantité donnée par simulation (Sirphyco) des déchets du nettoyage du blé	64
<b>Figure. 4.13</b> Représentation schématique d'un STP (Système de Traitement du Produit) Détaillons chacun de ses éléments	65
<b>Figure.4.14</b> Organigramme globale de l'entreprise.	70
<b>Figure.4.15</b> Réseau STP-CP du système de production	75
<b>Figure.4.16</b> Réseau STP-CP du système de production amélioré	76
<b>Figure.4.17</b> Interface SIMUL8	78
<b>Figure.4.18</b> Boite de dialogue (Point d'entrée de travail)	80
<b>Figure.4.19</b> Boite de dialogue (Centre de travail)	81

<b>Figure.4.20</b> Boite de dialogue (Convoyeur)	81
<b>Figure.4.21</b> Boite de dialogue (Centre de stockage)	82
<b>Figure.4.22</b> Boite de dialogue (Ressource)	83
<b>Figure.4.23</b> Boite de dialogue	83
<b>Figure.4.24</b> Modèle de simulation partie Nettoyage	86
<b>Figure.4.25</b> Modèle de simulation partie Mouture	88
<b>Figure 4.26</b> Décomposition du temps selon l'entreprise	89
<b>Figure.4.27</b> Comparaison entre le temps réel de nettoyage et le temps simulé	93
<b>Figure.4.28</b> Comparaison entre le temps réel de nettoyage et le temps simulé	94
<b>Figure.4.29</b> Comparaison entre le temps réel de nettoyage et le temps simulé	94

## LISTE DES TABLEAUX

<i>Tableau 1.1 Domaines d'application de la simulation</i>	10
<i>Tableau 1.2 Objectifs visés par la simulation</i>	10
<b>Tableau 2.1</b> Le rôle conjoint de l'indicateur de performance [lorino91]	31
<b>Tableau 4.1.</b> Information concernant les STP (sous-système de nettoyage)	68
<b>Tableau 4.2.</b> Information concernant les STP (sous-système de mouture)	68
<b>Tableau 4.3.</b> Information concernant le CP1	72
<b>Tableau 4.4.</b> Information concernant le CP2	73
<b>Tableau 4.5.</b> Information concernant le CP3	74
<b>Tableau 4.6.</b> Les différents paramètres utilisés pour chaque équipement du processus de production	87
<b>Tableau 4.7.</b> Les résultats obtenus par simulation pour chaque équipement	91
<b>Tableau 4.8.</b> Les valeurs des différents facteurs du TRS	92
<b>Tableau 4.9.</b> Planning de production réalisé pendant le premier trimestre	93

# **Introduction générale**

## **INTRODUCTION GENERALE**

**D**epuis le début de l'ère industrielle, toute action menée dans l'entreprise est justifiée par une vocation ultime de pérennité. Dans ce sens, l'entreprise se fixe des objectifs, met en œuvre des plans d'action et évalue la performance réalisée, c'est-à-dire le degré d'atteinte de ces objectifs. Dans un environnement très concurrentiel, les objectifs industriels, tout d'abord financier, concernent aujourd'hui également la qualité, le délai, la flexibilité, l'innovation... En conséquence. Le pilotage, qui n'agissait initialement que sur la productivité de la main d'œuvre directe au niveau opérationnel, s'est enrichi et agit désormais sur de multiples variables telles que les méthodes, les machines... et ce, du niveau stratégique au niveau opérationnel.

Dans ces conditions de globalité, qu'en est-il des indicateurs qui expriment la performance de l'entreprise ? Aujourd'hui, il est bien établi que l'indicateur exprime la performance par une comparaison d'une mesure à un objectif donné, et ceci pour aider le pilotage à agir sur une variable donnée. Des indicateurs conçus, dans leur triplet constitutif (variable, objectif, mesure), indépendamment les uns des autres, répondaient aux besoins d'un pilotage local et cloisonné. Par contre pour l'entreprise complexe du début du XXI siècle, cette approche ne correspond plus aux besoins d'un pilotage : la diversification des objectifs et les interactions entre les variables et les indicateurs de performance associés imposent une vision globale des indicateurs, dans leur conception et leur exploitation.

Ainsi mener une activité industrielle avec succès nécessite de prendre des décisions, difficiles, variées et peu répétitives, de piloter de manière précise et rapide, tout en faisant intervenir des paramètres nombreux et des phénomènes complexes... et ce, à tous les niveaux de l'entreprise. Le directeur de l'entreprise décidera de mettre un produit stratégique sur le marché pour contrecarrer l'avancée d'un concurrent... pendant que l'opérateur, prendra ses responsabilités pour réagir aux aléas de production et prendre les bonnes décisions sur son poste de travail afin de livrer ce produit à temps.

Il existe des outils pour aider ces hommes à piloter leur système. Nous avons choisi d'en retenir un : **la simulation**. Les progrès considérables de l'informatique ; ces dernières années, ont favorisé le développement de cette technique, devenue puissante dans tous les domaines

d'application et en l'occurrence, dans les systèmes de production, à tous les niveaux de l'entreprise... Elle permet de diminuer les risques d'erreurs engendrées par des décisions d'investissement et de conception de nouveaux systèmes. Son potentiel est vaste. Il recouvre tous les flux de l'entreprise (stratégique, tactique et opérationnel). De plus, toutes les phases du cycle de vie d'un système de production (conception, réalisation, exploitation) peuvent également être représentées par la simulation. Sa capacité à prévoir le comportement du système considéré, est une grande aide à la prise de décision pour l'industriel. Cette démarche est une phase d'expérimentation permettant « d'essayer » ses idées, d'en observer les conséquences, avant de les mettre réellement en place.

Même si la simulation est aujourd'hui en passe de s'imposer comme étant l'outil le plus performant pour l'aide à la prise de décision, en ce que concerne la gestion des systèmes de production en tout cas, il n'en reste pas moins que son utilisation demeure encore limitée par rapport à l'envergure de son potentiel, outre le fait que cette « sous utilisation » puisse être due à une méconnaissance de l'outil par les industriels, la complexité des concepts utilisés, la limite des outils, le manque de méthodologie d'application,... Constituent de réelles barrières à la pleine exploitation de ses possibilités.

Notre travail réalisé au sein du laboratoire d'automatique et productique LAP s'intègre dans une démarche de réalisation d'un guide de gestion pour les entreprises algériennes, précisément dans le domaine agroalimentaire, qui consiste à essayer d'offrir un panorama d'outils et méthode permettant l'amélioration, le développement, le contrôle et le suivi des systèmes de production sous les différents aspects (cout, délais et qualité). De cela on peut classer l'outil de simulation permet les outils offrant à son utilisateur un mécanisme de contrôle et suivi, qui peut être appliqué sur un système de production.

Pour cela, ce travail vise à réaliser un mécanisme d'évaluation de la performance d'un processus de production basé sur la simulation. Ainsi, l'approche utilisée consiste à l'utilisation conjointe de l'outil RdP et le logiciel de simulation SIMUL8 Afin de générer un dispositif permettant le suivi du processus de production par des indicateurs de performance, A cet effet, le 1<sup>er</sup> chapitre, représente un état de l'art sur la simulation. On commençant par un rappel des définitions, des objectifs de la simulation et la modélisation, pour présenter ensuite quelque application actuelle dans le monde industriel de la simulation. Nous présentant à la fin la démarche classique de l'utilisation de la simulation

***Le chapitre II*** regroupe une description des types de pilotage et les structures utilisées. Pour ce faire, un rapide historique sur le terme de pilotage industriel est présenté avant une analyse sur l'évolution du pilotage au cours de ces années et une typologie des structures de pilotage existantes.

***Le chapitre III*** fournit une réponse opérationnelle pour la conception du système de pilotage par simulation. La problématique est alors de fournir au système de pilotage, à partir des expressions de performance délivrées par les indicateurs de simulation, des informations synthétiques qui aident au choix d'un plan d'action parmi les plans générés.

***Le chapitre IV*** présente une application des idées présentées dans ce mémoire à la conception d'un modèle de simulation de la société ERIAD Batna. On met en exergue le potentiel de la simulation vis-à-vis du contrôle et suivi de la production.

---

# *Introduction à la Simulation*

---

## 1.1 Introduction

La simulation à événement discret est largement répandue pour évaluer les solutions de rechange de conception dans les systèmes de production. En effet la simulation est plus flexible et moins restrictive que les méthodes analytiques, c'est un outil pratique et unique pour analyser les comportements dynamiques des systèmes de production [Law, McComas 1998]. Les systèmes de production ont été l'un des plus grands domaines d'application de la simulation puisque leurs règles logiques sont mieux assimilées que d'autres systèmes [Law, McComas 1998].

Comparée aux méthodes analytiques, la simulation d'un point de vue économique est chère particulièrement lors du développement des modèles explicitant des comportements dynamiques des systèmes de production modernes. Souvent, le niveau du détail dans ces modèles de simulation est réduit suite à la restriction du budget et aux contraintes de temps, ce qui explique parfois la non validité des procédures de simulation.

Dans ce chapitre, on présente une introduction à la simulation d'un point de vue industriel, ainsi que quelques concepts de base qui sont souvent utilisés lors de la réalisation d'un modèle de simulation.

## 1.2 La Simulation

### 1.2.1 Définition de la simulation :

Il existe une multitude de définition sur la simulation, nous citons ci après quelque une

- La simulation est la technique de construire un modèle d'un système réel ou fictif afin que le comportement du système sous des conditions spécifiques puisse être étudié [Balle 1996].
- La technique d'imiter le comportement de quelques situations ou systèmes (économique, mécanique.. etc.) au moyen d'un modèle analogue, pour acquérir de l'information plus commodément, ou former le personnel [Law, McComas 1998].

### 1.2.2 Un modèle :

La notion de modèle est directement liée à la simulation, ainsi un modèle se définit comme :

- Une description simplifiée ou idéalisée d'un système, situation, ou processus, souvent dans les termes mathématiques, afin de faciliter les calculs et prédictions.
- Un modèle de simulation est un modèle descriptif qui imite les comportements d'un vrai système. Un vrai système peut être regardé comme source d'information pour le modèle de simulation qui inclut des règles logiques régissant l'exploitation du système simulé [Pegden, al 1990].
- Les modèles mathématiques sont les modèles les plus utilisés. Ils représentent un système sous forme de termes logiques et quantitatifs que nous pouvons manipuler pour voir comment le

système réagit, dans des conditions particulières à condition, bien sur, que le modèle soit validé [Law, Kelton 1991].

Les solutions analytiques sont des solutions exactes au modèle mathématique. Cependant, pour un modèle mathématique général on considère certaines hypothèses simplificatrices sans elles le modèle est très difficile à gérer. Ainsi l'étude du comportement du système pour différentes situations doit se faire au moyen d'un simulateur.

Les modèles peuvent être classés en trois catégories [Banks, Carson, Nelson, 1996] [Law, Kelton 1991] :

- Statique ou dynamique.
- Déterministe ou stochastique.
- Discret ou continu.

La simulation d'un modèle statique est une représentation d'un système sans évaluation. La simulation d'un modèle dynamique représente l'évaluation d'un système.

Si un modèle ne contient pas des composants probabilistes c'est un modèle déterministe c'est à dire le résultat de la simulation est toujours le même pour la même entrée. Dans une simulation stochastique le comportement est déterminé par des variables stochastiques. Un système discret est un système dans lequel les états des variables changent de manière discrète.

Un système continu est un système ou le changement des états des variables se fait de manière continue dans le temps.

La décomposition d'un système en entités simplifie son l'analyse, même s'il est complexe, les entités sont rarement complexes.

### **1.3 La simulation et l'analyse**

L'analyse par simulation est le processus de créer et d'expérimenter avec les mathématiques informatisées un modèle d'un système physique. Un système est défini comme un rassemblement des composants qui réagissent réciproquement et qui reçoivent une entrée et fournissent un résultat pour des objectifs définis. Ceci inclus aussi bien la simulation traditionnelle que la simulation d'apprentissage.

La simulation traditionnelle est utilisée pour analyser des systèmes et prendre les décisions de fonctionnement ou de politique d'exploitation des ressources utilisées dans le système étudié. La simulation d'apprentissage est utilisée pour former des utilisateurs capables de prendre des décisions, ou d'améliorer les performances du processus.

Dans le cas de notre travail on ne s'intéresse qu'à la simulation appliquée à des systèmes industriels, qui incluent :

- des machines.
- des opérations d'assemblage.
- la manutention.
- le stockage.

La simulation des opérations de production peut inclure des processus qui impliquent soit des opérations manuelles, des opérations automatisées ou des opérations numériques.

Les opérations d'assemblage peuvent couvrir tous types de chaînes d'usinage ou d'opérations industrielles qui exigent l'assemblage de plusieurs composants en un seul morceau.

La simulation de la manutention inclut les grues, les élévateurs, et les véhicules automatiquement guidés (AVG).

La simulation de stockage implique la prise en considération des matières premières ou produits finis.

## **1.4 Buts de Simulation**

Les modèles de simulation sont généralement utilisés pour les besoins suivants : [Pedgen, al 1995]:

- Donner un aperçu du fonctionnement du système.
- Amélioration et développement des performances des systèmes.
- Tester de nouveaux concepts avant la mise en œuvre.
- récolter des informations sans perturber le système réel.

### ***1.4.1 Donner un aperçu du fonctionnement du système***

Certains systèmes sont si complexes qu'il est difficile de comprendre leur fonctionnement et les interactions qui régissent dans ces systèmes, en absence de modèle dynamique. En d'autres termes, sans la simulation, il est impossible d'étudier un système en l'arrêtant ou en examinant ses différents composants en isolation. Un exemple typique de ceci : les goulots d'étranglement dans un processus de fabrication.

### ***1.4.2 Amélioration et développement des performances d'un système***

Pour améliorer un système existant, deux manières fondamentales existent. La première consiste à changer les politiques de fonctionnement, la seconde, changer le types des ressources exploitées, les deux types de changement ne peuvent se faire directement sur le système réel sans risque. Ainsi les essais de changement, quelque soit leur nature se font d'abord sur le modèle de simulation.

### **1.4.3 Tester de nouveaux concepts**

Si un système n'existe pas encore, ou si vous pensez acheter de nouveaux systèmes, un modèle de simulation peut vous donner une idée, à quel point le système proposé accomplira vos objectifs. Le coût de réalisation d'un modèle de simulation d'un nouveau système peut être très petit par rapport à l'investissement global de l'achat du système. L'utilisation d'un modèle de simulation avant exécution peut aider à raffiner la configuration de l'équipement choisi.

Actuellement, certaines compagnies exigent des fournisseurs d'équipement de développer une simulation de leurs systèmes proposés avant achat. Le modèle de simulation est employé pour évaluer les diverses réclamations des fournisseurs. Même après l'installation, le modèle de simulation peut être utile. La compagnie peut employer le modèle de simulation pour aider à identifier des problèmes si le système installé ne fonctionne pas comme prévu.

### **1.4.4 Récolter des informations sans perturber le système réel**

Les modèles de simulation sont, à notre connaissance, le seul outil disponible pour l'expérimentation des systèmes qui ne peuvent pas être manipulés. Certains systèmes sont si critiques ou sensibles qu'il est impossible de faire des modifications de fonctionnement ou de ressource pour analyser le système. L'exemple classique de ce type de système serait le contrôle de sécurité d'un aéroport commercial. En effet le changement de la politique de fonctionnement ou l'expérimentation du niveau de ressource aurait un impact sérieux sur l'efficacité opérationnelle ou sur la sécurité du système.

## **1.5 Avantages de la simulation**

En plus des possibilités précédemment décrites, un modèle de simulation présente les avantages spécifiques, suivants [Christopher A. Chung 2004] :

1. Conditions analytiques réduites.
2. Expérimentation en temps réduit.
3. Possibilité d'animation du modèle.

### **1.5.1 Conditions analytiques réduites :**

L'utilisation des méthodes analytiques permettait l'étude des systèmes simples. Pour les systèmes complexes, on devait faire appel à des experts en mathématique ou en recherche opérationnelle. Mais dans tous les cas, l'étude se limitait à l'aspect statique. En revanche, l'arrivée des méthodologies de simulation a permis d'étudier des systèmes dynamiques en temps réel suite à des scénarios de simulation. En outre, le développement des progiciels spécifiques a permis de faire un grand pas dans l'analyse des systèmes très complexes.

### ***1.5.2 Expérimentation en temps réduit :***

Puisque le modèle est simulé sur un ordinateur, les simulations expérimentales peuvent être faites en un temps réduit. C'est un avantage important vu que certains processus peuvent prendre des mois voir des années pour accomplir leurs tâches. Avec un modèle de simulation, l'opération et l'interaction des processus prolongés peuvent être simulées en secondes. Ceci signifie également que des répliques multiples de chaque scénario de simulation peuvent facilement être exécutées pour augmenter la fiabilité statistique de l'analyse. Ainsi et grâce à la simulation, la robustesse de n'importe quel système peut être étudié.

### ***1.5.3 Possibilité d'animation du modèle***

La plupart des logiciels de simulation spécifiques présentent la possibilité d'animer dynamiquement leur modèle. L'animation est utile pour corriger le modèle et également pour démontrer comment le modèle fonctionne. La correction basée sur l'animation permet au praticien d'observer des failles dans la logique du modèle. La simulation permet de démontrer dynamiquement comment le modèle du système manipule différentes situations, fonctionnement normal ou dégradé.

## **1.6 Inconvénients de la simulation**

Bien que la simulation présente beaucoup d'avantages, cela, n'exclut pas l'existence de quelques inconvénients que nous devons prendre en compte. Ces inconvénients ne sont pas directement associés au modèle et à l'analyse d'un système mais plutôt aux espérances liées aux projets de simulation. Ces inconvénients sont [Christopher A. Chung 2004]:

1. La simulation ne peut pas donner des résultats précis quand les données d'entrée sont imprécises.
2. La simulation ne peut pas fournir des réponses faciles aux problèmes complexes.
3. La simulation ne peut pas résoudre tous les problèmes à elle seule.

### ***1.6.1 La simulation ne peut pas donner des résultats précis quand les données d'entrée sont imprécises :***

Le premier rapport peut être expliqué en tant que "entrée fausse, résultat faux." Pour n'importe quel modèle développé, si le modèle n'a pas des données d'entrée précises, le spécialiste ne peut pas espérer obtenir des résultats précis. En effet, la collecte de données est considérée comme la partie la plus difficile du procédé de simulation. Mais en dépit de cela, il est connu que trop peu de temps est assigné à cette opération.

Beaucoup de spécialistes de simulation se leurrent d'accepter des données historiques de qualité douteuse afin de sauver le temps de collecte de données d'entrée. Trop souvent la nature exacte ou les conditions dans lesquelles ces données ont été rassemblées sont inconnus. Dans plus d'un cas, l'utilisation des données historiques extérieurement rassemblées a été la base d'un projet de simulation non réussi.

### ***1.6.2 La simulation ne peut pas fournir des réponses faciles aux problèmes complexes :***

Certains analystes croient qu'une analyse de simulation fournira des réponses simples à des problèmes complexes. Cependant, il est plus probable d'avoir des réponses complexes à des problèmes complexes. Si le système à analyser a beaucoup de composants, le choix d'une meilleure politique de fonctionnement ou de ressource est susceptible d'examiner chaque élément du système. Cependant, si des éléments critiques du système sont ignorés, alors n'importe quelle politique d'opération ou de ressource est susceptible d'être moins efficace.

### ***1.6.3 La simulation, à elle seule, ne peut pas résoudre tous les problèmes :***

D'autre part, des utilisateurs de la simulation peuvent croire que la simulation, elle seule résoudra le problème. La simulation par elle-même ne résout pas réellement le problème. Elle fournit au gestionnaire les solutions potentielles pour résoudre le problème. Il appartient aux individus responsables de gestion de mettre en application réellement les changements proposés. Pour cette raison, le spécialiste doit maintenir les dépositaires de directeur ou de client aussi impliqués dans le projet autant que possible.

### ***1.6.4 D'autres Considérations***

En plus des avantages et des inconvénients de la simulation précédemment discutés, le spécialiste devrait se rendre compte de quelques autres considérations judicieuses en s'embarquant sur un projet de simulation. Ces considérations peuvent influencer la décision du spécialiste à ne pas entreprendre le projet du tout. Celles-ci incluent ce qui suit [Christopher A. Chung 2004]:

1. La réalisation d'un modèle de simulation peut exiger une formation spécialisée.
2. La simulation peut être coûteuse.
3. Les résultats de simulation impliquent beaucoup de statistiques.

***1. La réalisation d'un modèle de simulation peut exiger une formation spécialisée***

Dans le passé, il était extrêmement difficile d'exécuter un modèle de simulation. Il était nécessaire de créer le code source, de compiler et exécuter le programme. Si n'importe quels virgules, deux points, ou période étaient mal placés, le spécialiste reçoit un groupe d'erreurs de compilation. Ainsi, sans qualifications de programmation d'ordinateur, il était difficile d'établir avec succès un modèle de simulation. Mais de nos jours cette difficulté se situe plutôt au niveau de l'aspect pluridisciplinaire.

En effet, la simulation et l'analyse des processus, sont très complexes, elle nécessite la connaissance de plusieurs disciplines tel que l'informatique, les mathématiques, la recherche opérationnelle, et surtout les statistiques. Heureusement le développement croissant des systèmes informatiques a permis l'utilisation d'interfaces graphiques pour la simulation. Ceci a raisonnablement facilite la tache de l'expert.

***2. La simulation peut être coûteuse***

Il n'y a aucun doute que le développement d'un modèle complexe de simulation peut prendre beaucoup de temps et par conséquent être coûteux. Même si le spécialiste est compétent avec un logiciel efficace de simulation, un système complexe exigera toujours une quantité d'heure proportionnellement plus grande pour la collecte des données, la réalisation du modèle, et l'analyse. Bien que beaucoup de simplifications peuvent être fait sur le modèle pour réduire la quantité de temps d'élaboration, ces simplifications peuvent également être si extrêmes qu'elles rendent les modèles inadmissibles. Ainsi, il y a une limite pour la simplification d'un modèle de simulation.

***3. Les résultats de simulation impliquent beaucoup de statistiques***

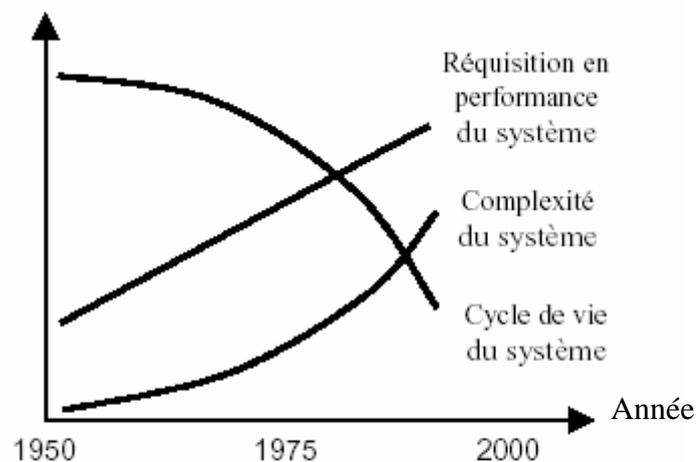
En conclusion, les résultats de simulation sont généralement présentés sous forme de statistiques. Pour cette raison, il est difficile pour des individus sans aucune notion de statistique d'interpréter des résultats de simulation. On suppose que n'importe quel spécialiste de simulation ait au moins une connaissance même limitée des statistiques.

**1.7 Simulation et complexité de modélisation des systèmes manufacturiers*****1.7.1 Complexité du système de prise de décision***

L'environnement actuel caractérisé par une compétition féroce, une augmentation des exigences des clients et le développement des technologies avancées, a forcé les compagnies à repenser la manière avec laquelle elles gèrent leurs affaires. Aujourd'hui, les consommateurs

demandent une meilleure qualité, des produits personnalisés et des services à bas prix. Dans ce contexte, le défi des manufacturiers est représenté par les facteurs suivants (Fig. 1.1) :

- Les systèmes ont des cycles de vie courts suite aux besoins en changements constants et la prolifération des nouvelles technologies.
- Systèmes devenus de plus en plus complexes résultant de la disposition de technologies plus sophistiquées et d'une plus grande intégration des processus.
- Systèmes nécessitant une plus haute performance à cause de l'augmentation de la compétition et des exigences des clients.



**Figure 1.1** Croissance du besoin en performance du système, augmentation de la complexité et réduction du cycle de vie

### 1.7.2 Limites (faiblesses) des méthodes analytiques

Dans un environnement très compétitif et des défis à relever constamment, les entreprises sont face à des problèmes importants qui nécessitent des décisions importantes dans des délais courts. Ainsi les ingénieurs et les gestionnaires sont à la recherche d'outils plus performants d'aide à la conception et à la planification opérationnelle des systèmes. Les méthodes traditionnelles tels que l'analyse du travail, les diagrammes de flux, l'analyse des processus, la programmation linéaire, etc. sont incapables de résoudre les problèmes complexes d'intégration d'aujourd'hui. Ces outils ont un champ d'application limité et sont incapables de fournir une mesure fiable de la performance espérée du système.

Les modèles analytiques ne représentent pas fidèlement la réalité puisqu'ils sont une agrégation (une simplification) de la réalité et souvent basés sur des hypothèses simplificatrices et non réalistes. Les modèles analytiques sont difficiles à valider auprès des utilisateurs puisque ce sont des modèles synthétiques qui génèrent parfois des résultats non conformes à la réalité.

En l'absence d'outils efficaces de planification et d'évaluation de systèmes, plusieurs compagnies optent pour les méthodes d'essai et d'erreur, qui sont avérées assez coûteuses consommant beaucoup de temps pour fournir un bénéfice acceptable.

### **1.8 Augmentation de la popularité de la simulation**

La simulation a été, pour la première fois, utilisée en 1950 dans la planification stratégique au niveau militaire. Elle n'a gagné sa popularité dans les domaines manufacturiers et de services qu'au début des années quatre-vingt. Pour plusieurs compagnies, la simulation est devenue une pratique standard lorsqu'une nouvelle usine est à implanter ou un changement de procédé nécessite d'être évalué. Les études indiquent que la simulation se classe au premier rang devant les techniques de recherche opérationnelle et de sciences de gestion en terme de popularité et d'utilité [Shannon 1980].

Plusieurs facteurs ont contribué à l'augmentation de l'utilisation de la simulation. Parmi eux on cite:

- Croissance de la conscience et de la compréhension des nouvelles technologies (automatisation).
- Augmentation de la disponibilité, de la capacité et de la facilité d'utilisation des logiciels de simulation.
- Augmentation des capacités en mémoire et en vitesse de traitement des ordinateurs (surtout au niveau des PC).
- Chute des coûts des ordinateurs.
- Adoption répandue des micro-ordinateurs.
- Disponibilité de l'animation graphique.

La disponibilité de logiciels de simulation spécialisés et faciles à utiliser et d'ordinateurs puissants a non seulement rendu la simulation plus acceptable, mais aussi plus accessible aux concepteurs et aux gestionnaires qui n'ont ni le temps ni l'intérêt d'apprendre des techniques d'analyse difficiles et complexes.

Les différents domaines d'applications de la simulation sont résumés dans le tableau 1.1. Le tableau 1.2 résume les objectifs communs qui ont motivé l'étude par simulation dans le passé.

RÉGION	DOMAINES D'APPLICATION DE LA SIMULATION
<b>Systèmes informatiques</b>	Les composants «hardwares», les logiciels, le réseau du «hardware», les bases de données et la gestion, le processus d'information, la fiabilité des «hardwares» et des logiciels, etc.
<b>Domaines manufacturiers</b>	Systèmes de manutention, les lignes d'assemblage, les installations de production automatisée, les installations de stockage, les systèmes de contrôle d'inventaire, l'étude de fiabilité et de maintenance, le plan d'aménagement, le design des machines, etc.
<b>Les affaires</b>	Analyse des stocks et des commodités, la politique des prix, les stratégies de marketing, les études d'acquisition, les "cash flow", les prévisions, les alternatives de transport, la planification de la main-d'œuvre, etc.
<b>Gouvernement</b>	Les armes militaires et leurs utilisations, les stratégies militaires, planification de la population, l'utilisation des terres, la distribution des soins médicaux, la protection contre les feux, services de polices, etc.
<b>Ecologie et environnement</b>	La pollution des eaux et leur purification, contrôle des déchets, la pollution de l'air, le contrôle des empoisonnements, les prédictions du temps, les explorations minérales et leur extraction, les systèmes d'énergie solaires, etc.
<b>Sociale et comportement</b>	Analyse de nourriture/population, les politiques d'éducation, structures organisationnelles, analyse du système social, les administrations universitaires.
<b>Bio-sciences</b>	Les analyses des performances du sport, le contrôle des maladies, les cycles de vie biologiques, les études biomédicales, etc.

Tableau 1.1 Domaines d'application de la simulation

SUJET	OBJECTIFS DE LA SIMULATION
<b>Evaluation</b>	Déterminer les performances du design de systèmes proposés quand ils sont évalués sous des critères bien spécifiques.
<b>Comparaison</b>	Comparer des designs de systèmes compétitifs pour une fonction spécifique, ou comparer différentes politiques d'opérations ou de procédures proposées.
<b>Prédiction</b>	Estimer les performances du système sous certaines conditions.
<b>Analyse de sensibilité</b>	Déterminer lesquels des facteurs sont les plus significatifs dans l'affectation des performances d'un système.
<b>Optimisation</b>	Déterminer quelle combinaison de variables donne la meilleure réponse.
<b>Relations fonctionnelles</b>	Etablir la nature des relations entre les variables et la réponse du système.

Tableau 1.2 Objectifs visés par la simulation

## 1.9 Concepts de base de la simulation

Comme toute démarche structurée, la simulation nécessite la compréhension de quelques concepts fondamentaux. Ces concepts permettent de réaliser des modèles plus proches de la réalité. Nous citons:

- Les composants de base de la simulation.
- Listes des événements de la simulation.
- Mesures statistiques de la performance.

### 1.9.1 Les composants de base de la simulation

Pour les buts de la démonstration, considérons le système le plus simple qui peut avoir de l'intérêt dans l'industrie [Christopher A. Chung 2004].

Les exemples de ce type de système simple incluraient, mais ne sont pas limité à:

- Un centre du service après-vente avec un représentant ;
- Un officier de l'emprunt de l'hypothèque dans une banque ;
- Une machine gérée par un ordinateur dans une usine ;

Chacun de ces systèmes simples consiste en trois types de composants majeurs:

1. Entités.
2. Files d'attente.
3. Ressources.

Les rapports parmi ces composants sont illustrés dans la Figure 1.2

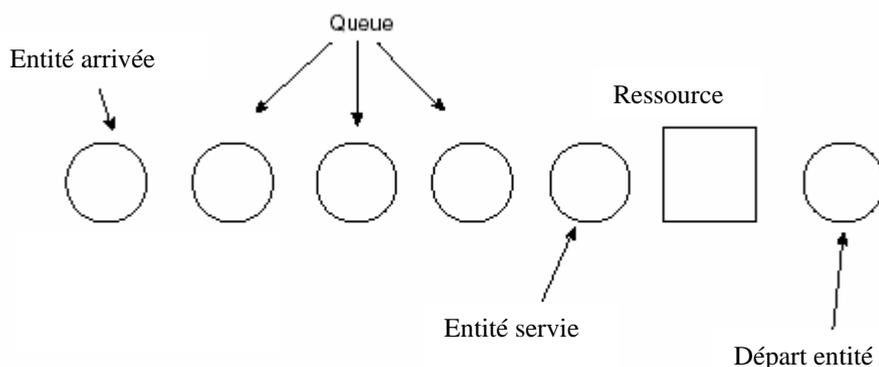


Figure 1.2 Les composants de base de la simulation

### **1. Entités**

L'entité est l'élément qui change l'état du système. Cet élément peut être une personne, exemple dans un service après vente, les entités sont les clients, par contre dans une usine les entités sont les composants qui attendent d'être usinés.

#### Groupe d'entité

Il représente le nombre d'entités qui arrivent dans un système au même instant. Dans certains systèmes, la dimension du groupe d'entité est toujours une. Dans d'autres cas, les entités peuvent arriver en groupes de dimensions différentes. L'exemple des familles qui vont au cinéma, les dimensions des groupes dans ce cas est de deux, trois, quatre ou plus.

#### Attributs de l'entité

Ce sont des variables associées à chaque entité du système. A un attribut on peut associer différentes valeurs, exemple le temps d'arrivée d'une entité.

Les programmes de simulation peuvent utiliser aussi des variables globales, qu'il ne faut pas confondre avec les attributs de l'entité. Ces variables diffèrent des attributs de l'entité par le fait que chaque variable globale maintient uniquement une valeur à un temps donné.

### **2. Queues ou file d'attente**

La deuxième composante de base de la simulation est la file d'attente. Les entités attendent généralement dans une file leur tour pour être traité. Une des caractéristiques des files d'attente est qu'une fois l'entité dans la file, elle ne peut en ressortir qu'après avoir reçu le service.

### **3. Ressources**

La troisième composante que les systèmes simples contiennent est les ressources. Ces derniers traitent ou servent les entités. Les exemples des ressources sont:

- Représentants du service après-vente.
- Coiffeurs.
- Machines.
- ....etc.

Les ressources peuvent être soit au repos, ou occupées. Les ressources sont au repos quand elles sont disponibles pour travailler, et il n'y a pas d'entités qui attendent dans la file. Les ressources sont occupées quand elles traitent des entités. Les ressources sont non disponibles à cause de:

- Arrêt du travail.
- Repas.
- Vacances.

- Périodes de l'entretien préventif.
- ....etc.

Les ressources inactives correspondraient à:

- Machines cassées.
- Matériel inopérant.
- .....etc.

### ***1.9.2 Listes des événements de la simulation***

La liste des événements de la simulation est un moyen qui permet de se tenir au courant des changements qui se produisent pendant une simulation [Loi et Kelton, 2000]. N'importe quoi qui se produit pendant la simulation peut affecter l'état du système. Il est défini comme un événement. Les événements typiques dans une simulation simple incluent l'arrivée de l'entité, le commencement et la fin du temps du service pour les entités. Ces événements changent l'état du système parce qu'ils peuvent augmenter ou diminuer le nombre d'entités dans le système ou changer l'état des ressources.

Les événements sont contrôlés par une horloge de simulation. Dans une simulation à événement discret, l'horloge de simulation est une horloge discrète. Dans les modèles plus sophistiqués, l'horloge de simulation peut opérer de façon continue. Ce type de modèle est associé habituellement avec des processus continus qui impliquent fluide ou matière (qui pourrait être modélisée comme fluides). On peut également modéliser un système qui implique des composants discrets et continus.

Un exemple de ce type de système, une raffinerie qui remplit des camions. Les réservoirs de la raffinerie ou est entreposé le liquide exigent une simulation continue, pendant que les camions sont modélisés discrètement.

Sans se soucier, si le modèle est discret, continu, ou hybride, la liste des événements de la simulation est extrêmement importante au utilisateur. Dans un modèle très simple, beaucoup d'événements différents, peuvent se produire simultanément. Sans un moyen cérémonieux de se tenir au courant de ces événements, les mesures de performance du système deviendraient désespérément compliquées. C'est, en fait, la raison essentielle de rendre effectif toute simulation sur un système informatique.

### 1.9.3 Mesures statistiques de la performance

La plupart des modèles de simulation réalisés ont pour objectif de déterminer comment le système réel doit fonctionner. Pour cela nous devons calculer quelques mesures de performance du système simulé, pour les comparer aux solutions alternatives élaborées suivant le modèle. Les mesures de performance peuvent être basées sur l'observation ou sur les lois probabilistes. Il y a quatre mesures communément utilisées pour déterminer les performances d'un système simulé [Kelton et al, 2002]:

- Temps moyen de service.
- Temps moyen d'attente.
- Nombre moyen dans la file.
- Taux d'utilisation de la ressource.

#### 1. Temps du système

Temps moyen de service est une mesure de la production basé sur l'observation. C'est le montant total des temps de traitement de l'entité dans le système. Ce temps commence quand l'entité arrive dans le système et entre dans la file. Il se termine quand l'entité est traitée, et sort du système. La représentation mathématique du temps moyen du service est :

$$\text{Temps moyen de service} = \frac{\sum_{i=1}^n T_i}{n}$$

Où :

$T_i$  = le temps de service pour une entité individuelle (temps de l'arrivée, temps du départ)

$n$  = le nombre d'entités qui sont traitées à travers le système.

#### 2. Temps moyen d'attente

Le temps moyen d'attente est aussi une mesure d'observation, il est très utilisé vu qu'il permet de déterminer le temps d'attente acceptable par le client. La formule pour le temps moyen d'attente est :

$$\text{Temps moyen d'attente} = \frac{\sum_{i=1}^n D_i}{n}$$

Où

$D_i$  = le temps d'attente pour une entité individuelle

$n$  = le nombre d'entités qui sont traitées à travers la file.

3. Nombre moyen dans la file

Le nombre moyen dans la file est une mesure statistique, elle représente le nombre moyen d'entités que vous pourriez vous attendre à voir dans la file à tout moment pendant la période du traitement. Il faut noter qu'à tout moment dans la file on aura réellement un nombre discret d'entités. Cependant, parce que le nombre moyen dans la file est une valeur moyenne, il faut s'attendre à trouver un nombre qui a une valeur fractionnaire. La formule pour calculer le nombre moyen dans une file est :

$$\text{Nombre moyen dans la file} = \frac{\int_0^T Q dt}{T}$$

Où

$Q$  = le nombre dans la file pour une durée donnée.

$dt$  = la durée où  $Q$  est observé.

$T$  = la durée totale de simulation.

La Figure 1.2 présente un exemple de calcul du nombre moyen dans une file d'attente.

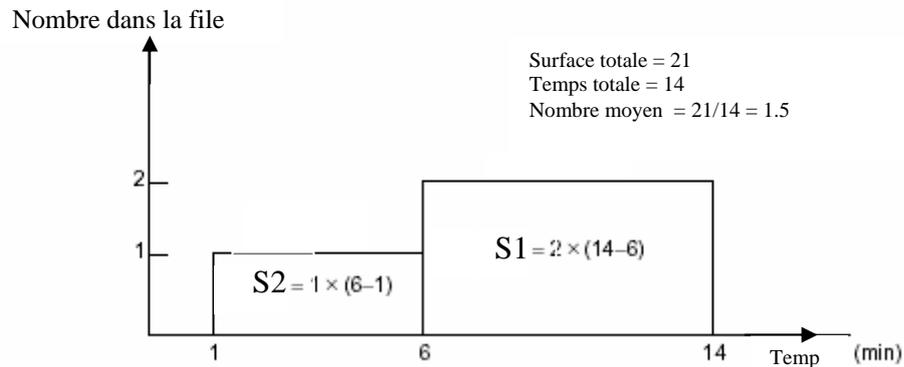


Figure 1.3 Exemple de calcul du nombre moyen dans une file d'attente

4. Taux d'utilisation de la ressource

Le taux d'utilisation de la ressource est aussi une valeur statistique. À tout moment une ressource peut être au repos ou utilisée. Au repos le niveau d'utilisation de la ressource égale à 0. Il est de 1 dans l'autre cas. La durée pendant laquelle la ressource est au niveau 0 ou 1, est une fonction des entités qui entrent dans le système. La formule pour le calcul du taux d'utilisation de la ressource est

$$\text{Taux d'utilisation de la ressource} = \frac{\int_0^T B dt}{T}$$

$B = 0$  ressource libre.

$B = 1$  ressource occupée.

$dt$  = la durée ou B est observé.

$T$  = la durée totale de la simulation.

### **1.10 Conclusion**

L'objectif majeur d'une entreprise de production ou de service est d'assurer sa pérennité sur le marché, en améliorant systématiquement son organisation à tous les niveaux. Aussi pour réussir, une entreprise doit disposer de moyens qu'ils lui permettent d'évaluer les solutions proposées avant de les mettre en application pour réduire le risque d'erreurs.

L'outil de simulation offre un moyen de validation des solutions de rechange, en réduisant le taux d'erreurs par l'application des solutions proposées sur un système imaginaire proche de la réalité.

---

*Notion de pilotage  
industriel*

---

## 2.1 Introduction

Depuis le premier choc pétrolier, l'environnement des entreprises a été modifié sous l'effet de :

- L'évolution économique et industrielle (mondialisation des marchés, restructurations rapides et brutales, concurrence, etc.),
- L'évolution financière (développement des marchés financiers, internationalisation, accentuation des contraintes induites par les manoeuvres financières, etc.), et
- L'évolution sociale (diminution des capacités hebdomadaires, etc.).

Parallèlement à ces évolutions, l'entreprise doit également faire face au développement rapide et constant des technologies de communication et de traitement de l'information qui a considérablement élargi le spectre des applications informatiques utilisables en son sein.

Ainsi pour se maintenir sur un marché de plus en plus concurrentiel, toute entreprise qu'elle soit de bien ou de service doit régulièrement suivre sa situation vis-à-vis ses objectifs. Autrement dit l'entreprise doit être pilotée.

Le pilotage de production est constitué de l'ensemble des outils permettant aux acteurs de l'entreprise de savoir où ils en sont. Il suppose la détermination d'objectifs partagés par tous les acteurs puis la mise en place d'indicateurs de suivi des résultats par rapport à ces objectifs.

Un état de l'art sur la décision et le pilotage industriels présenté dans ce chapitre étant réalisé, cela nous a permis de développer la notion de pilotage, que ce soit du point de vue structure quant au type de pilotage.

## 2.2 Le Pilotage de production : pour quoi faire?

Le rôle du pilotage peut être vu sous différents aspects. Ces aspects se différencient suivant la situation de l'entreprise, ses objectifs et sa stratégie. D'après [A. Laure 05] l'importance du pilotage peut être définie selon les points suivants :

- *Le pilotage de production pour le suivi des actions passées*

Le pilotage de production permet de suivre des indicateurs qui représentent l'efficacité et/ou l'efficacité de l'organisation.

- *Le pilotage de production pour la motivation*

Le personnel est tenu au courant de sa performance par rapport à des objectifs définis et peut proposer des améliorations de l'organisation si nécessaire. La performance étant mesurée, il est possible d'en parler de manière rationnelle. De plus, une équipe qui modifie son organisation connaît très vite l'impact de cette modification sur la performance.

- *Le pilotage de production pour définir le futur*

Le pilotage de production permet de déceler des tendances, par exemple, déterminé :

- les objectifs futurs de l'entreprise.
- Une stratégie commerciale qui permet de développer la production.
- Les modifications nécessaires aux objectifs fixés suite à une évolution de l'environnement (hausse de prix de matière première, évaluation de la réglementation, changement du prix de vente d'un produit).

- *Le pilotage de production pour optimiser cette production*

Lorsque la production n'atteint pas ses objectifs, actuels ou futurs, l'entreprise doit s'adapter instantanément et optimiser son fonctionnement.

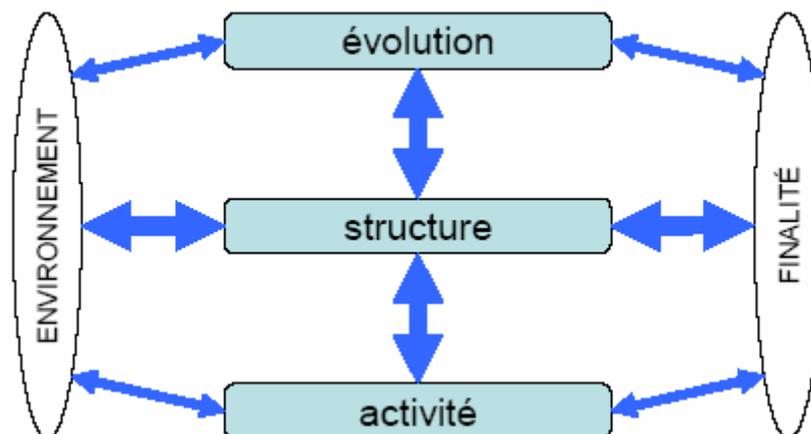
Le pilotage de production, qui a permis d'identifier le problème, permet alors de mesurer l'impact des mesures adoptées.

### 2.3 L'entreprise-système

De façon mnémotechnique, un système peut être perçu comme [LeM 77] :

- quelque chose (n'importe quoi présumé identifiable),
- qui dans quelque chose (environnement),
- pour quelque chose (finalité ou projet),
- fait quelque chose (activité = fonctionnement),
- par quelque chose (structure = forme stable),
- qui se transforme dans le temps (évolution).

Suivant cette définition, on peut représenter un système selon la figure 2.1



**Figure 2.1** Le paradigme systémique [LeM 77]

Une entreprise peut être caractérisée de la façon suivante :

- Quelque chose : ENTREPRISE,

- Qui dans quelque chose : ENSEMBLE DE MARCHES,
- Pour quelque chose : CROITRE ET SURVIVRE,
- fait quelque chose : PRODUIRE,
- Par quelque chose : ENSEMBLE DE MOYENS,
- Qui se transforme dans le temps.

Ainsi une entreprise est un système complexe (figure 2.2), qui peut être décrit comme un enchaînement partiellement ordonné d'exécution d'activités pour réaliser un objectif [Thé 02].

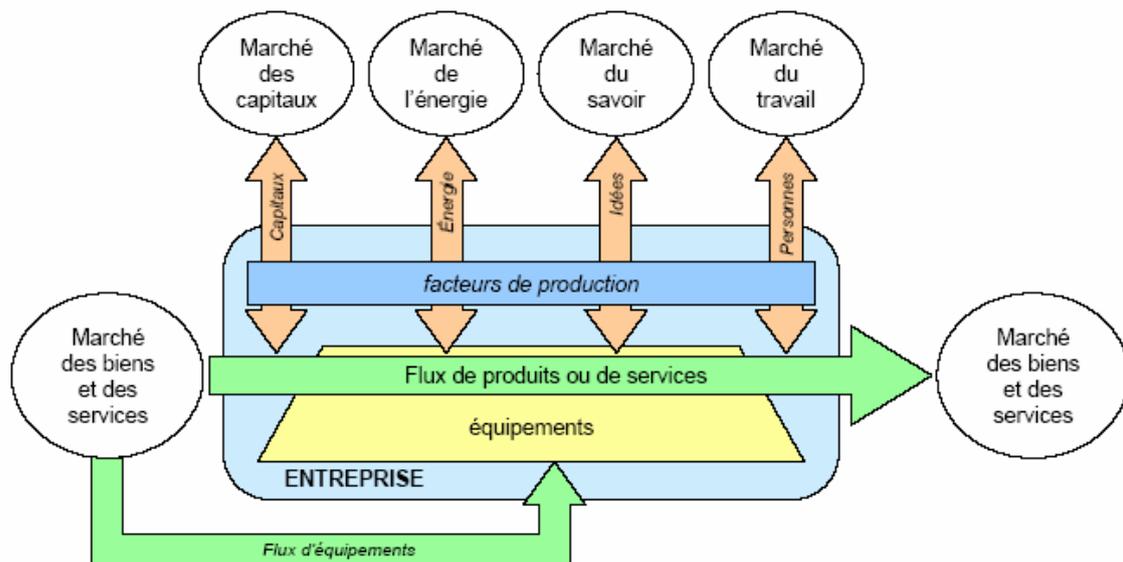


Figure 2.2 L'entreprise-système [L. BLANC]

## 2.4 La fonction « pilotage » dans un système

A l'heure actuelle, il n'existe pas de définition unique ni stable du terme pilotage. Ainsi nous allons présenter les définitions suivantes : L'Organisation Internationale de Normalisation « International Standard Organization » (ISO) propose pour le pilotage la définition suivante :

*“Factory control is defined as the actuation of a plant to make products, using the present and past observed state of the plant and demand from the market”* (Le pilotage des systèmes de production est défini comme l'activation du système pour fabriquer des produits, en utilisant le présent et les états passés observés et les demandes à partir du marché.) [ISO 86].

Pour [Trentesaux et al] « *le pilotage consiste à décider dynamiquement des consignes pertinentes à donner à un système soumis à une perturbation pour atteindre un objectif donné décrit en termes de maîtrise de performances. La notion de maîtrise intègre non seulement celle de maintien d'un niveau de performance donné, mais également celle de progrès (évolution vers un niveau de performance souhaité ou avec une amélioration continue)* ».

Le pilotage dans un système de production, a pour objectif principal « la bonne exécution du programme prévisionnel de production par le système physique » [Nagi 91]. Cette fonction assure :

- l'exécution des ordres de fabrication (ordonnancement et lancement),
- la coordination des opérations et des tâches (pour la réalisation d'un processus),
- la synchronisation des opérations (contraintes de précédences),
- la sélection en temps réel du mode de production (opter pour une gamme alternative en cas de problème sur une ressource donnée),
- le suivi des séquences opératoires (suivi des gammes),
- le contrôle de la production (contrôle de la qualité, contrôle des cycles),
- la correction des écarts par rapport au plan de production (modification des OF, quantités, délais).

Le pilotage s'appuie sur les valeurs des variables essentielles pour mettre en oeuvre les deux fonctions suivantes [TAT 87] figure 2.3:

- La fonction de contrôle qui détermine les valeurs des variables d'action en fonction des valeurs des variables essentielles,
- La fonction de régulation du système opérant qui, à l'aide de boucles de rétroaction, agit sur les variables d'entrée pour maintenir les variables de sortie à leurs valeurs désirées.

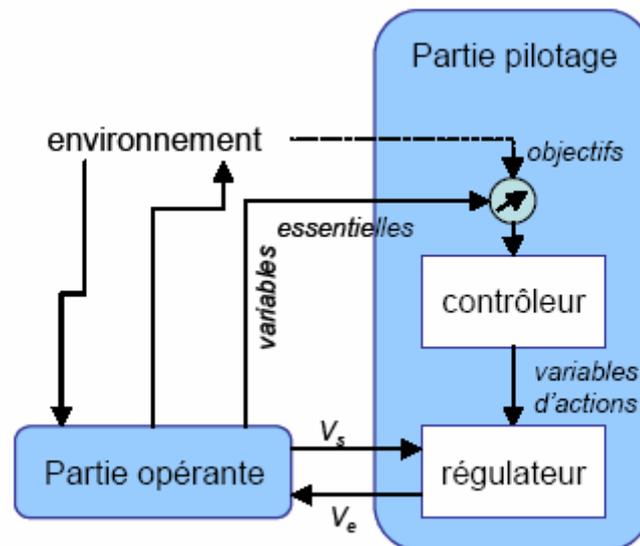


Figure 2.3: Fonction pilotage [TAT 87]

Ainsi Grabot et Huguet [Grabot *et al.* 96] [Grabot *et al.* 97] considèrent le pilotage comme un ensemble d'activités permettant la production à court terme dans l'atelier en accord avec les objectifs établis par la gestion de production et en adaptant la production aux perturbations pouvant survenir au niveau de l'atelier ou de son environnement.

**Le pilotage d'atelier n'est donc pas limité au seul ordonnancement et son rôle est plus étendu que celui du contrôle d'atelier**, qui se borne à assurer l'exécution des activités de production.

Pour Youssef [Youssef 98], le pilotage a pour but **d'assurer la cohérence des décisions entre des ordres issus de la gestion prévisionnelle** (planification à court terme) **et les actions exécutées au niveau du système de production**. Il doit en outre faire face aux contraintes de la gestion prévisionnelle (décisions, objectifs) et aux aléas du système physique (pannes machines, perturbations, retards, ...).

Le pilotage est appréhendé à travers quatre phases (chaque phase mettant en oeuvre des fonctions spécifiques) [Thé 02] :

- La phase initialisation construit le référent capable d'atteindre l'objectif fixé en précisant les activités à exécuter et leur enchaînement,
- La phase d'évolution exécute les activités du référent et évalue les situations obtenues par rapport aux situations attendues,
- La phase de correction stoppe l'évolution, corrige une non-conformité (situation obtenue non conforme à la situation attendue) en construisant un nouveau référent,
- La phase de terminaison évalue globalement le processus suite à son déroulement (état final atteint).

## 2.5 Typologie des structures de pilotage

Les systèmes de pilotage de production peuvent être classés en fonction de leur structure ou de l'existence d'un ordonnancement. Divers travaux de recherche ont analysé l'évolution des différentes structures existantes, leurs avantages et leurs inconvénients. De nouvelles architectures ont été proposées pour améliorer les performances des applications industrielles existantes et répondre aux besoins des futurs systèmes de production.

### 2.5.1 Caractérisation suivant l'existence ou non d'un ordonnancement prévisionnel [Trentesaux 96]

Pour pouvoir aborder ce point il faut d'abord définir ce qu'est un ordonnancement. Nous utilisons la définition générale d'un ordonnancement donnée par Parunak [Parunak 91]:

“Un ordonnancement est un sous-ensemble du produit cartésien  $Quoi * Où * Quand$  pour un sous-ensemble de l'ensemble des tâches à réaliser”.

On peut différencier les types de pilotage selon qu'un ordonnancement prévisionnel des tâches est réalisé ou non:

1- *Pilotage sans ordonnancement prévisionnel* : Le niveau prévisionnel n'élabore aucun ordonnancement. La gestion des allocations et des files d'attente se fait dynamiquement au fur et à mesure de l'évolution événementielle du système de production.

2- *Pilotage à ordonnancement prévisionnel* : Dans ce cas, l'ordonnancement est défini par le niveau prévisionnel. Par définition, une opération, appartenant au sous-ensemble des opérations à réaliser, à laquelle est associée une ressource, une date de début et une date de fin de fabrication est une opération planifiée. Nous distinguons l'ordonnancement prévisionnel partiel de l'ordonnancement prévisionnel total:

1. *Pilotage à ordonnancement prévisionnel partiel* : Un ordonnancement prévisionnel est dit partiel si le sous-ensemble des opérations planifiées est inclus (inclusion stricte) dans l'ensemble des opérations à réaliser (figure 2.4) Les approches de pilotage à ordonnancement prévisionnel partiel se différencient selon:

- Le choix du sous-ensemble,
- Les méthodes d'ordonnancement partiel.

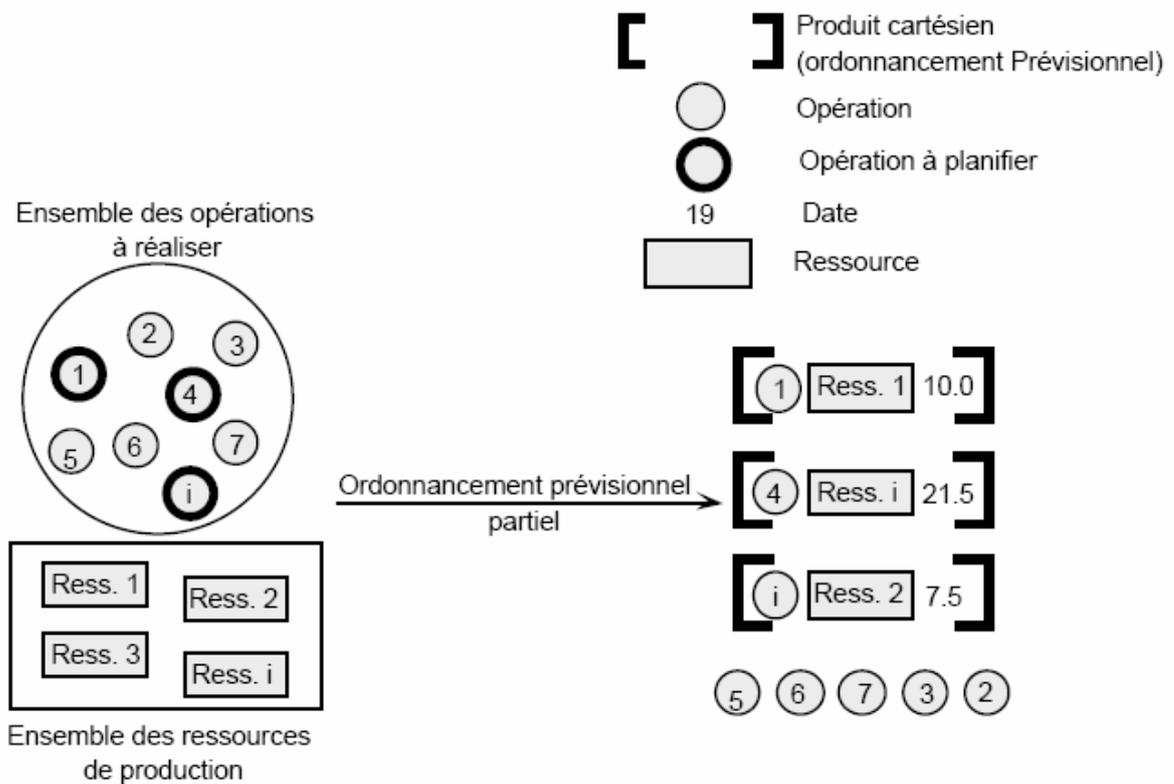


Figure 2.4: Pilotage à ordonnancement prévisionnel partiel [Trentesaux 96]

2. Pilotage à ordonnancement prévisionnel *total* : Un ordonnancement prévisionnel est dit total si le sous-ensemble des opérations planifiées est celui des opérations à réaliser (figure 2.5),

Le pilotage avec ordonnancement prévisionnel total constituait il y a quelques années l'unique type de pilotage implémenté sur les sites industriels. Le Pilotage sans ordonnancement prévisionnel constitue une approche beaucoup plus récente et fait actuellement l'objet de nombreuses études. La théorie du pilotage à ordonnancement prévisionnel partiel est à ce jour relativement bien développée. Pour chacun de ces trois types de pilotage, différentes structures peuvent être utilisées.

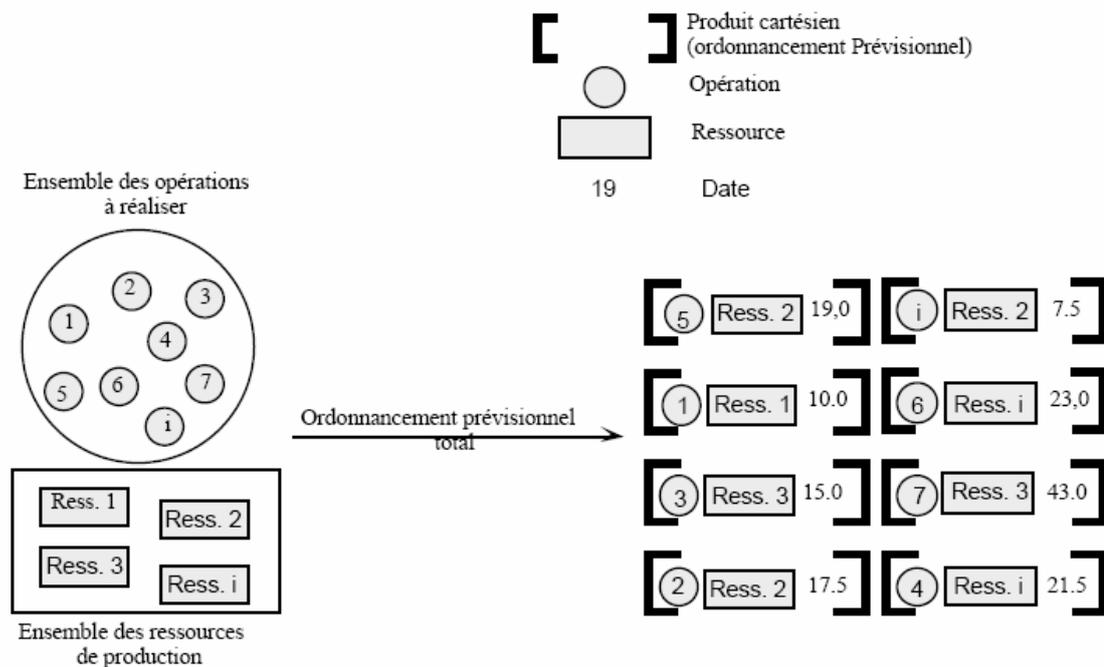


Figure 2.5: Pilotage à ordonnancement prévisionnel total [Trentesaux 96]

### 2.5.2 Caractérisation selon la structure de pilotage

Nous recensons plusieurs approches concernant la structuration du pilotage [Trentesaux 96] [Dindeleux 98] [Roy 98] [Youssef 98].

#### 1- L'approche centralisée

Il s'agit de l'approche la plus classique et la plus ancienne. Elle se caractérise par un pilotage localisé au sein d'une ressource unique. Cette dernière supervise la production et gère en temps réel les événements qui surviennent tout au long de la production sur le système composé de plusieurs ressources (figure 2.6).

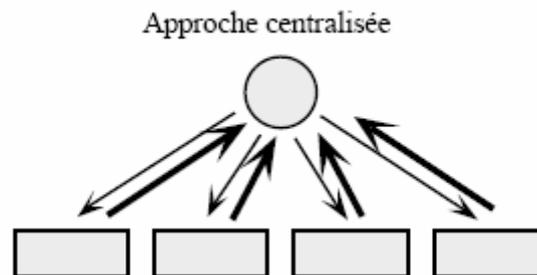
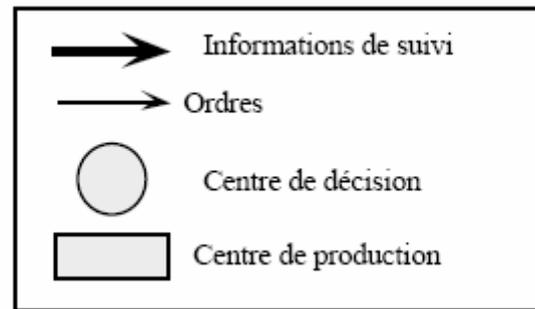


Figure 2.6 : Approche centralisée [Trentesaux 96]

## 2- Approche non centralisée

Dans l'approche non centralisée, on trouve plusieurs typologies

### 2-1- L'approche hiérarchisée

Dans ce type d'approche, la notion de niveau d'abstraction permet de modéliser une usine complète. Chaque niveau coordonne les unités de pilotage du niveau inférieur, et ce jusqu'au niveau le plus bas. Donc, chaque niveau a des relations de dépendance vis à vis du niveau supérieur et de dominance vis à vis du niveau inférieur. Chaque décision est élaborée au niveau où un problème est détecté. Les niveaux inférieurs traitent cette décision comme une contrainte et transmettent en retour une information de suivi au niveau supérieur. La gestion temps réel concerne les niveaux atelier, cellule, poste de travail et automate. Différentes présentations détaillées des nombreuses études réalisées, sont fournies dans [Archimède 91], [Trentesaux 96], [Dindeleux 98], [Youssef 98] (figure 2.7).

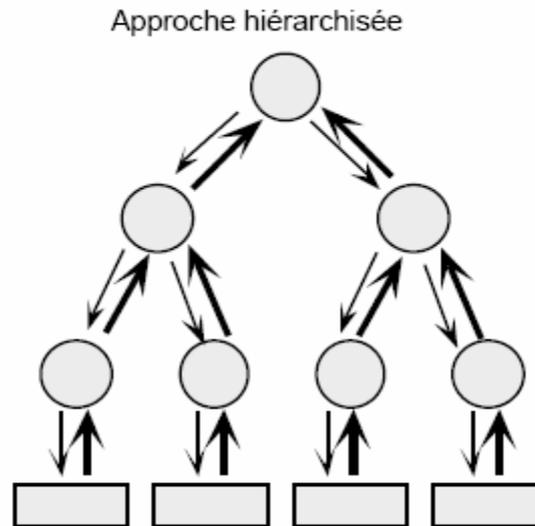


Figure 2.7 : Approche hiérarchisée [Trentesaux 96]

### 2-2- L'approche coordonnée

L'approche coordonnée correspond à un ensemble de structures hiérarchisées où une coopération est possible au sein d'un même niveau (figure 2.8). Ces structures accroissent la capacité de décision au sein de chacun de ces niveaux.

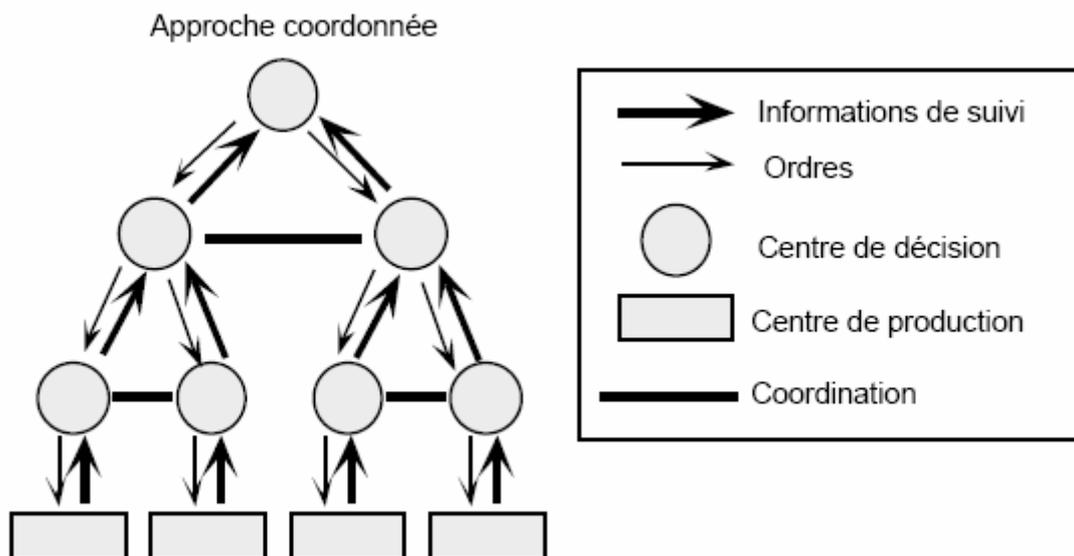


Figure 2.8 : Approche coordonnée [Trentesaux 96]

Les solutions envisagées pour la réalisation d'un ordonnancement prévisionnel sont fonction de la coopération intra-niveau. Celle-ci doit améliorer la réactivité en proposant une décomposition dynamique du problème au niveau où il apparaît plutôt qu'une décomposition hiérarchique des ordres vers les niveaux inférieurs. Cet aspect dynamique et cette coopération enrichissent la qualité de la décision. Le résultat est une meilleure intégration temps-réel des perturbations.

Cependant, cette coordination intra-niveau nécessite la création d'un contrôle particulier qui, tout en permettant une remise en question plus importante des décisions du niveau 1, doit gérer ces décisions afin d'assurer leur cohérence relative.

### 2-3- Structure hétérarchique

Le substantif hétérarchie (en anglais, Heterarchy) et son adjectif hétérarchique (en anglais, heterarchical) constituent des néologismes à la fois en français et en anglais. Ce terme est formé à partir de deux termes grecs : *heteros* (autre) et *Arckhein* (commander), signifiant ainsi à l'origine « *commandement par les autres* ». L'hétérarchie renvoie à l'idée d'acteurs différents qui assument en collégialité la coordination d'une action collective donnée et s'oppose par essence au terme *hiérarchie* [Trentesaux, 2002]. La structure hétérarchique est appelée aussi structure décentralisée (distribuer). Dans cette structure il n'existe pas d'unité de contrôle de niveau hiérarchique supérieur pour coordonner l'ensemble des unités (voir figure 2.9).

Les unités de contrôle sont multiples et en interaction ; elles peuvent alors s'autoorganiser pour assurer des tâches globalement cohérentes. Ces unités disposent des propriétés suivantes [Cho, 1993] :

1. égalité du droit d'accès aux ressources,
2. accès et accessibilité mutuelle entre elles,
3. mode de fonctionnement indépendant,
4. conformité stricte aux règles et protocoles du système global.

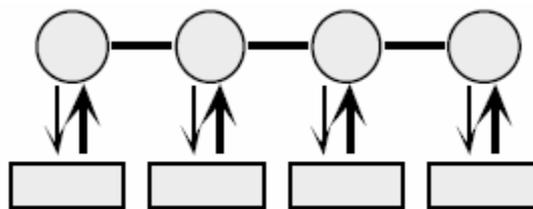


Figure 2.9 : Approche hétérarchique [Trentesaux 02]

### 2-4- Structure hybride

Les deux structures hiérarchiques et hétérarchique présentent des avantages et des inconvénients pour le pilotage des SP. Certains travaux de recherche ont essayé de préserver les avantages des deux structures en proposant une nouvelle structure hybride en combinant les deux structures

Dans la structure hybride, les unités de contrôle de même niveau hiérarchique sont interconnectées via un même moyen de contrôle. Elles sont capables de communiquer et de coopérer pour satisfaire leurs objectifs locaux. Lors de perturbations, l'ensemble des unités de

contrôle peuvent demander de l'aide à leur moyen de contrôle pour résoudre les problèmes détectés.

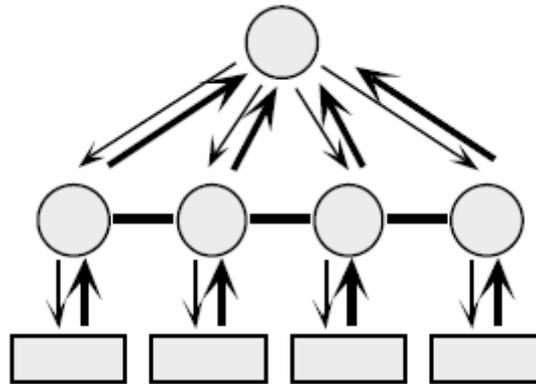


Figure 2.11 : Approche hybride [Trentesaux 02]

## 2.6 Place de la prise de décision dans le pilotage

Les travaux traitant de la théorie se sont développés durant la deuxième guerre mondiale, lorsque mathématiciens et statisticiens anglo-saxons ont élaboré des méthodes pour rationaliser les choix militaires et économiques, qui sont connues sous le nom de recherche opérationnelle [Lemaître 81].

Selon Barabel [Barabel 96], l'activité de décision est définie comme « **l'ensemble des actions que le décideur effectue pour prendre sa décision et la mettre en oeuvre** ». Cette activité varie selon les entreprises et les types de décisions : la prise de décision stratégique, par exemple, est considérée comme étant celle qui conditionne le plus la survie de l'entreprise à long terme.

Pour Le Moigne [Le Moigne 74], décider, c'est « identifier et résoudre les problèmes que rencontre toute organisation ».

La décision est une partie intégrante du pilotage. Et pour piloter, nous serons confrontés à un choix de décision monocritère ou multicritère.

### 1. La décision monocritère

Tant que le but est unique, le choix « est simple »; il suffit de préciser **la nature du critère** et de le comparer aux incidences de chacune des actions envisagées dans chacune des situations possibles : il s'agit de décision monocritère.

### 2. La décision multicritère

Mais dans la plupart des cas, l'entreprise doit faire face à des situations plus délicates, avec des objectifs multiples, comme réduire les coûts, améliorer la qualité, réduire les délais de livraison, ... Ses derniers sont souvent contradictoires et impliquent une prise de décision difficile.

L'analyse multicritère [Roy 85] [Roy *et al.* 93] vise à fournir au décideur une solution satisfaisante en prenant en compte plusieurs facteurs simultanément. Le principe est de faire un choix avec rigueur en confrontant les solutions envisagées avec les objectifs fixés au départ [Kalfoun *et al.* 95].

La prise de décision est considérée alors comme le processus d'élaboration et de sélection progressive de solutions... et à tout moment, dans une analyse multicritère, le décideur se trouve confronté à un grand nombre de choix.

Dans le cas de décisions complexes, ou décisions « multicritères », le décideur a plusieurs valeurs de référence pour pouvoir juger les diverses solutions [Dindeleux 98] [Rondreux 00].

Des méthodes d'aide à la décision applicables lorsque l'on poursuit des objectifs multiples ont été mises au point. Voici quelques unes des méthodes permettant de sélectionner parmi plusieurs décisions satisfaisantes, la décision la plus efficace pour l'utilisateur, conformément à ses préférences :

- Les méthodes hiérarchiques
- Les méthodes « linéaires »
- Les méthodes itératives

### 2.6.1 Prise en compte des contraintes

L'ensemble des alternatives d'un décideur est souvent limité par le respect de certaines **contraintes** provenant de l'environnement et du système physique. Le système de décision doit tenir compte de ces contraintes qui **délimitent l'ensemble des solutions acceptables**. De ce fait, les objectifs d'un acteur-décideur sont exprimés de deux manières [Pellet 85] :

- Comme une **contrainte**, ce qui signifie que le décideur donne des bornes au domaine de variation de l'objectif,
- Comme un **critère**, c'est-à-dire qu'il lui attribue une « bonne » et une « meilleure » valeur (en suivant les méthodes proposées précédemment).

La gestion des contraintes est donc importante dans la prise de décision pour le pilotage [Roubellat *et al.* 98]. En tenant compte des contraintes (par exemple : contraintes de gammes, contraintes opératoires propres à l'atelier, contraintes temporelles), il est possible de gérer certains conflits existants. Il s'agit de la propagation des contraintes.

### 2.6.2 Une typologie de la décision dans le cadre du pilotage industriel [trentesaux 96]

Parmi les diverses classifications existante [Barabel 96] [Pellegrin 97] [Pierreval 99], et selon les points de vue différents, on peut citer:

- **l'horizon de production** : concerne beaucoup plus les décisions opérationnelles, tactiques et stratégiques
- la **périodicité** : avec des décisions selon la période ou selon l'événement, auxquelles seront liées des **décisions en temps réel**
- le **domaine d'application** : avec des décisions économiques, technologiques et humaines
- le **nombre d'acteurs** : avec des décisions individuelles et collectives, [Habchi *et al.* 99a]

Nous résumons les différentes classifications sur le référentiel de l'horizon de production, selon la figure 2.12

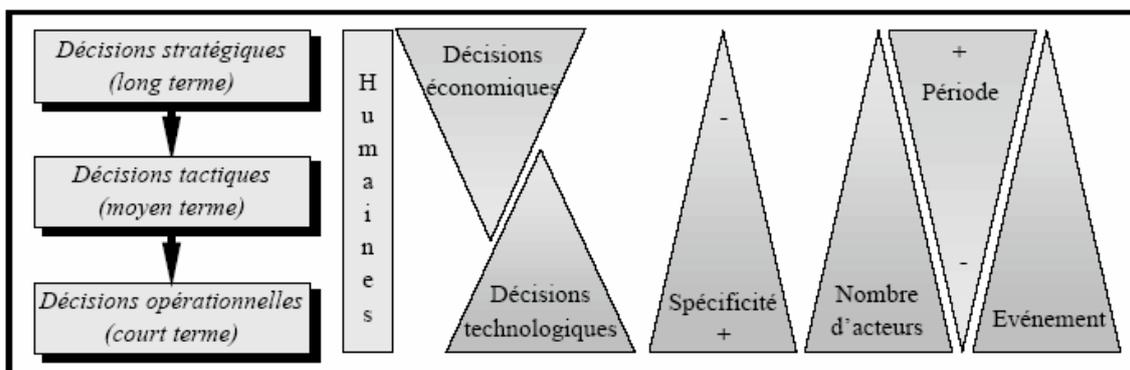


Figure 2.12 Typologie de la décision dans le pilotage industriel

Pour un objectif stratégique donné, retenons que piloter revient à réaliser quatre actions suivantes, conformément à la roue de deming :

- Générer un plan d'action dans un environnement donné (plan),
- Mettre en œuvre ce plan d'action (DO),
- Contrôler le système piloté pendant la mise en œuvre et au terme du plan d'action (Check),
- Réagir suite à ce contrôle (Act),

La contrôlabilité du système piloté nécessite alors la mise en place d'un instrument capable :

- d'exprimer sa performance par rapport à un objectif globale,
- d'indiquer à la structure de pilotage les variables d'action pour améliorer cette performance.

Ces informations sont les expressions de performance délivrées par le système d'indicateur [Clivillé 04].

## 2.7 Le système d'indicateur pour le pilotage industriel

### 2.7.1 L'indicateur de performance

Selon AFNOR : « Un indicateur de performance est une donnée quantifiée, qui mesure l'efficacité et/ou l'efficacité de tout ou partie d'un processus ou système (réel ou simulé) par rapport à une norme, un plan ou un objectif déterminé et accepté dans le cadre d'une stratégie de l'entreprise ». D'autre part, pour positionner l'indicateur dans son environnement, il faut lui associer :

- Une variable d'action déterminante,
- Un plan d'action ou une action de celui-ci,

Dans ce cadre, le rôle de l'indicateur est aujourd'hui bien défini. Il « autorise fondamentalement une boucle de retour dans le processus de décision » [Bitton 90] appelée boucle de pilotage. Sur la base de l'information retournée, le centre de décision enclenche ou pas une action sur la ou les variables d'action considérées : en fonction de la performance constatée, un plan d'action est enclenché sur les variables d'action dont l'effet est ensuite mesuré, et une nouvelle boucle peut se dérouler (figure 2.13).

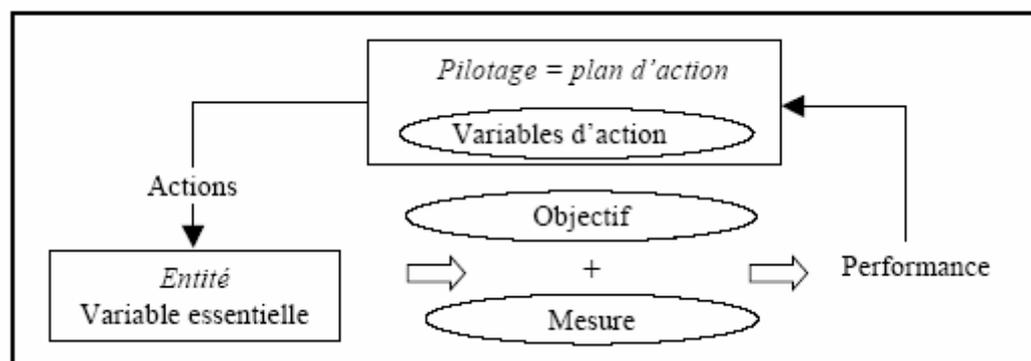


Figure 2.13 La boucle de pilotage à travers l'indicateur [Clivillé 04]

Dans ce sens, nous conservons la proposition de voir l'indicateur comme un triplet [Bitton 90] qui associe trois paramètres : un objectif, une mesure et une variable essentielle [Berrah 02]. Cette variable (une quantité, un coût, un délai) est à observer *à posteriori* pour vérifier le degré d'atteinte de l'objectif assigné au système. Les expressions de l'objectif et de la mesure sont comparées pour délivrer une expression de la performance. Mais pour assurer la contrôlabilité, connaître l'état du système ne suffit pas, il faut interpréter cette expression de performance et lancer, en fonction de cette interprétation, les actions nécessaires sur les variables d'action identifiées.

Ainsi, d'une façon générale, un objectif peut être atteint en jouant sur la *main d'œuvre*, le *milieu*, les *méthodes*, les *machines* ou la *matière* pour reprendre la typologie des 5M, soit autant de familles de variables d'action. Dans l'approche par niveaux généralement retenue [Van Gigch 91], ces variables d'action d'un niveau donné deviennent les variables essentielles pour définir les objectifs des centres de décision de niveau inférieur, sur des horizons plus rapprochés [Lorino 01]. Les nouveaux indicateurs du niveau inférieur remplissent alors deux fonctions :

- une fonction rétrospective, qui analyse le résultat de révolution d'une entité selon une variable essentielle ; on parle alors **d'indicateur de résultat** qui évalue le degré d'atteinte d'un objectif global à son horizon : dans la tableau 2.1, l'indicateur A1 joue le rôle d'indicateur de résultat pour le centre de décision de niveau N,
- une fonction prospective, qui analyse l'évolution d'une entité pendant la mise en œuvre du plan d'action ; on parle alors **d'indicateurs de processus** qui jalonnent le plan d'action (grâce à la définition d'objectifs locaux dont l'horizon est antérieur à celui de l'objectif global) et permettent de réagir avant la fin de celui-ci ; dans le tableau 2.1, les indicateurs A1, A2, A3 sont des indicateurs de processus pour le centre de décision de niveau N-1.

Niveau décisionnel	Indicateur de résultat	Indicateurs de processus
Niveau N+1	A B	
Niveau N	A1	
Niveau N-1	Etc.	

Tableau 2.1 Le rôle conjoint de l'indicateur de performance [lorino91]

Un centre de décision dispose alors d'un indicateur de résultat et de plusieurs indicateurs de processus liés à cet indicateur de résultat. Dans ce cas, la boucle de pilotage associée à l'indicateur de résultat doit se décliner en autant de boucles locales qu'il y a d'indicateurs de processus identifiés [Clivillé 01]. Ces boucles locales ont alors des liens de :

- Coordination, si les performances des entités de même niveau sont dépendantes.
- Subordination, si la performance d'une entité à un niveau donné contribue à celle du niveau supérieur, elle doit apparaître dans la structure de pilotage et entre les indicateurs mis en place.

La norme [ISO 9000 00] formalise **l'indicateur** au moyen des dix paramètres, qui sont:

- L'identification de l'indicateur.
- Le champ de la mesure,
- L'objectif
- Les critères.
- Les paramètres.
- Le mode de calcul, les responsabilités et la périodicité de la collecte des informations.
- Le mode de communication.
- L'exploitation des informations.
- Les responsabilités et modalités de l'analyse des indicateurs.

Constatons que dans le cadre actuel du pilotage, les indicateurs sont multiples, soumis à des liens de coordination et de subordination et doivent garantir conjointement que les différentes actions entreprises pour atteindre l'objectif global ne sont pas contradictoires. Il est donc naturel de les considérer en tant que système, affiché sous forme de tableaux de bord, ce qui fait alors apparaître un certain nombre de problèmes inexistantes dans la pratique [De Toni 97].

### *2.7.2. Les indicateurs dans le cadre du pilotage*

Comme tout système de l'entreprise, le système d'indicateurs n'est pas livré « clés en main » pour la mise en œuvre du pilotage, pas plus qu'il ne serait invariant quelles que soient les évolutions de son environnement [Crawford 90]. Pour mettre en place un tel système revenons à sa vocation qui est d'aider à la transformation d'un plan d'action conformément à un objectif global. Il s'agit donc :

En premier lieu, de délivrer des expressions de performance afin de :

- générer et choisir le plan d'action pour atteindre un objectif global ce qui correspond à une phase de **conception** du système d'indicateurs qui n'existait pas préalablement à la définition de cet objectif global,
- mettre en œuvre le plan d'action et de le clôturer, ce qui correspond à une phase **d'exploitation** du système d'indicateurs conçu dans la phase précédente.

En second lieu de s'adapter aux changements de **l'environnement** du système d'indicateurs lors de la **transformation** du plan d'action, ce qui correspond à une phase de **révision** du système d'indicateurs, parallèle à la phase d'exploitation.

Chacune de ces phases pose à son tour un certain nombre de problèmes. Il convient de les détailler dans le cadre d'une structure de pilotage, en particulier au travers des liens de subordination et coordination évoqués dans le paragraphe précédent. .

## **2.8 Conclusion**

On a vu dans ce chapitre que le pilotage de la production est une décision tactique qui répond à un souci de régulation à moyen terme de la production et qu'elle constitue un lien entre les décisions opérationnelles du court terme et les décisions stratégiques du long terme. Cette problématique se retrouve principalement dans les systèmes productifs produisant pour stock ou assemblant à la commande. Après avoir examiné les caractéristiques des travaux de recherche portant sur ces organisations, nous constatons qu'il n'existe pas de modèle idéal de pilotage qui puisse être utilisé à tout moment et dans tous les environnements.

Chaque structure peut être efficace pour certains types de problèmes et d'environnements, suivant le contexte, les contraintes dynamiques et temporelles, etc.

Le chapitre suivant traite également les problèmes de pilotage mais, en introduisant la simulation comme outil de suivi et de contrôle, par l'utilisation des techniques permettant l'adaptation de l'outil de simulation au pilotage de la production.

---

# *Pilotage par Simulation*

---

### **3.1 Introduction**

Dans le monde actuel turbulent et instable, il est assez délicat de fonder le pilotage de l'entreprise sur des prévisions et des planifications plus ou moins à long terme. En effet avec la rapidité du changement et la constance des imprévus, les plans se révèlent rapidement inadéquats et ce dernier se rapproche plus d'une navigation « aux aguets ».

Classiquement, les instances dirigeantes visent une finalité pour l'entreprise, bâtissent une stratégie et la déclinent en un certain nombre de plans tactiques, matérialisés par des procédures d'action. Le changement actuel, par rapport aux approches traditionnelles, porte principalement sur le déroulement des actions tactiques qui ne sont plus référencées par des procédures prédéterminées mais fondées sur une plus grande autonomie des acteurs de terrain, aptes à agir et réagir selon les événements. Mais pour que le pilotage s'effectue dans de bonnes conditions, le décideur doit bénéficier d'**un instrument de mesure** fiable et recueillant toute sa confiance, et qui offre une certaine rigidité dans le traitement d'information: la SIMULATION.

La simulation est une démarche qui peut dominer le hasard de l'expérience en établissant un système de relations entre un nombre restreint d'entités censées représenter le réel. De très nombreuses représentations sont possibles. Elles correspondent à une certaine grille de lecture du réel.

Dans ce chapitre nous annonçons notre centre d'intérêt, à savoir le pilotage des systèmes de production par simulation.

### **3.2 La Simulation en Gestion**

Quand on parle de la simulation industrielle, cela veut dire l'utilisation de la simulation dans un environnement de fabrication. La simulation des systèmes de production peut être employée presque dans tous les processus de fabrication qui existent actuellement. Elle est comme un champ d'étude et de compensation très utile, qui peut être largement étendues [Miller et Pegden, 2000]. Dans ce champ, la simulation est employée pour la conception et la planification de la production.

Dans la gestion, la **simulation** s'appuie sur une certaine représentation du fonctionnement d'un système productif pour en imiter le comportement et la réaction lorsqu'il est soumis à certaines sollicitations (demande, perturbations...) et d'en évaluer les principales caractéristiques de fonctionnement dans le contexte étudié. Dans le but d'en tirer des conséquences opérationnelles : adaptations éventuelles des ressources en équipements, opérateurs et procédures, contrôle des entrées dans le système...etc.

Dans cette section, nous présentons quelques exemples de l'utilisation de la simulation dans un environnement industriel.

### **1. Simulation de la chaîne logistique**

La simulation peut être adoptée pour améliorer pratiquement la Gestion de la Chaîne Logistique (GCL) entre les sociétés. Traditionnellement la chaîne logistique ne comporte qu'une entreprise simple, des équipements multiples et des centres de distribution. Le partage d'information détaillée n'est ainsi pas un problème. Mais vu que la portée de la chaîne logistique a évolué pour croiser les frontières d'entreprise, le partage d'information peut devenir difficile pour les compagnies. La GCL implique le contrôle de l'écoulement du matériel et de l'information pour les étapes multiples de la fabrication, le transport et la distribution dont l'objectif de diminuer les coûts. Le domaine principal d'application de la simulation dans la gestion de la chaîne d'approvisionnements est d'analyser les changements des divers aspects de la chaîne logistique. [Gan et al 2000] présentent une technologie appelée la simulation à événement parallèle discret qui implique une capacité de cacher les détails des modèles lors de la simulation. En utilisant cette technologie, le système global à simuler est décomposé en sous modèles qui peuvent être simulés indépendamment.

### **2. Simulation dans la planification et l'établissement des programmes**

Actuellement, on peut utiliser la simulation comme outil dans la planification et l'établissement des programmes de production. La planification a pour tâche de déterminer les besoins tandis que l'établissement du programme consiste à décider comment la fabrication doit être accomplie. La simulation est mieux adaptée à la tâche d'établissement des programmes de production, elle peut manipuler tous les paramètres nécessaires au processus de fabrication. Pour l'aspect planification des ressources d'entreprise, la simulation permet de créer des programmes faisables, qui inclut des données de la charge courante de production, grâce à un modèle, qui utilise les données de planification de manière intégrée. En effet un module de planification qui contient un plan planifiable alimente le modèle, qui produit une liste détaillée d'opérations montrant comment les ressources seront employées et renvoie cette information à la fonction de planification pour l'utiliser dans la période suivante de planification [Musselman et al. 2002].

### 3. Simulation et aide à la décision

#### a. La simulation informatique : un outil d'aide à la conception d'un système de production.

La figure 3.1 décrit le processus « classique » de conception de système automatisé de production en utilisant la simulation.

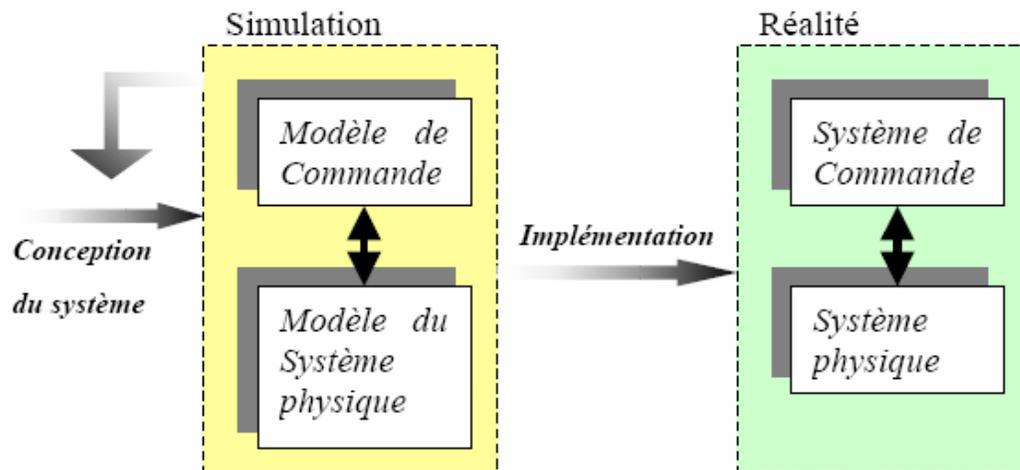


Figure 3.1. Conception par simulation

Un modèle de simulation permet de prévoir des indicateurs de performance du futur système de production en fonction des choix qui sont fait tant en ce qui concerne le dimensionnement du système physique que de la conception du système de commande. Ce modèle de simulation entre dans une boucle d'optimisation permettant par améliorations successives, d'affiner la conception du système. Notons qu'on a structuré le modèle de simulation en deux parties :

#### b. La simulation informatique : vers la notion d'émulation.

L'émulation consiste à tester le système de commande réalisé sur un modèle de simulation du système physique. Le gros avantage est que la mise au point du système de commande peut être menée alors que le système physique n'a pas encore été réalisé. Cela permet d'une part de diminuer la durée de la mise au point finale, et d'autre part de mettre au point le système de commande en toute sécurité. (Une erreur de commande a peu de conséquences pour le modèle virtuel du système physique). Cela permet enfin de former les conducteurs de la future ligne de production (figure 3.2).

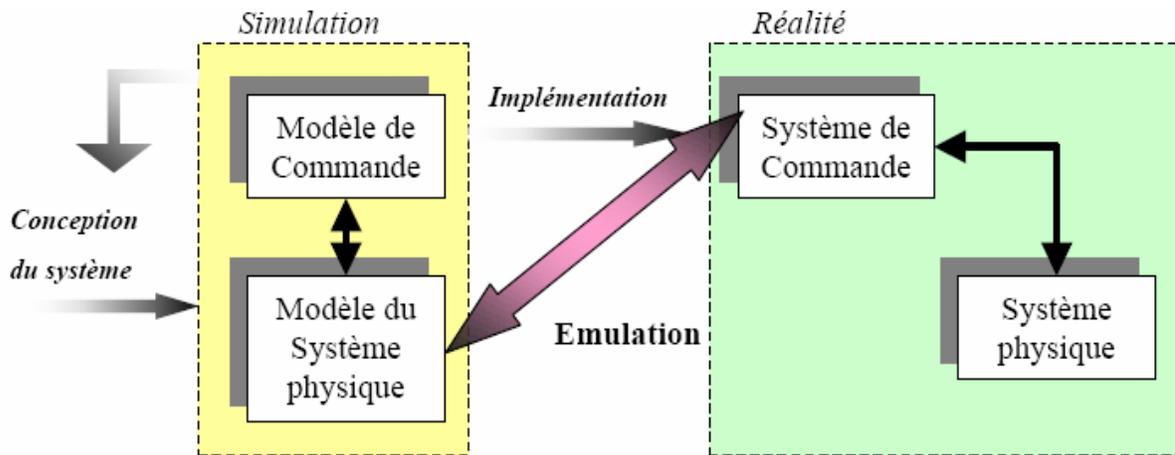


Figure 3.2. Concept d'émulation

### c. La simulation informatique : un outil de commande.

L'idée de commander un système à partir d'un modèle de simulation vient de la constatation suivante : Un modèle de simulation est un système automatisé. Nous voulons dire par cela qu'il renferme un modèle du système de commande qui lui permet toutes les prises de décision, durant la simulation. Lors de la mise en place d'un nouveau système de production, l'apport de la simulation est très intéressant pour la définition du système de commande de ce système de production.

La question qui vient ensuite naturellement est : Pourquoi ne pas utiliser le "système de commande" développé et validé lors de la phase de simulation pour commander directement le système réel (figure3.3) ? Notons que cette nouvelle approche est rendue plus facile grâce à l'apparition sur le marché d'outils de simulation ayant une architecture très ouverte [MUE01], [SCH01] (ARENA, AUTOMOD, SIMPLE++...) Ces outils utilisent différents types d'interfaces comme par exemple les échanges DDE (Dynamic Data Exchange), DLL (Dynamic Link Library), TCP/IP.....

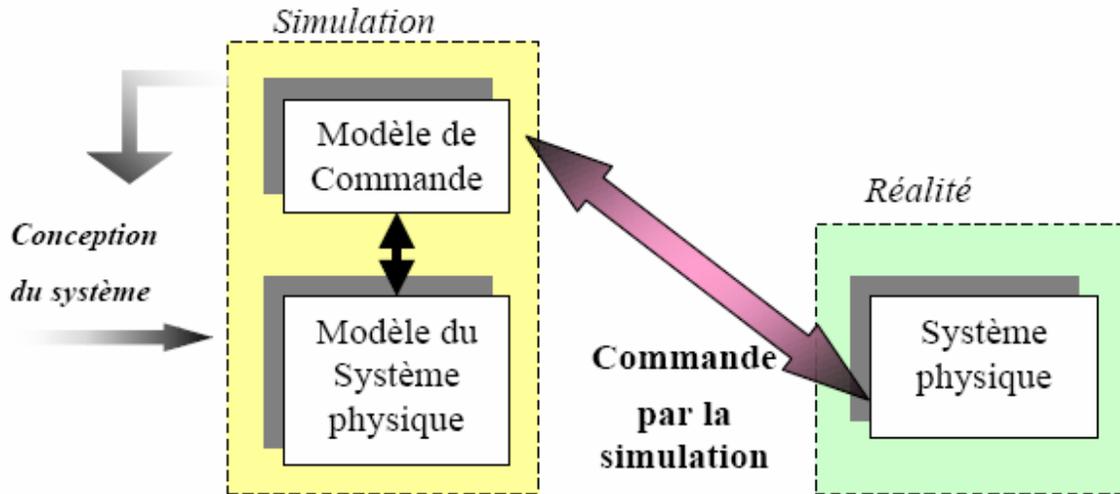


Figure 3.3. Commande par simulation

Si ces outils permettent d'envisager cette approche de la commande, il n'en reste pas moins quelques problèmes, aussi intéressants que redoutables, à résoudre [VER01]:

- 1 – Cette approche suppose que l'on sache séparer « modèle de commande » et « modèle du système physique ». Cette séparation est loin d'être évidente dans la plupart des outils de simulation.
- 2 – On est rapidement confronté au problème du TEMPS. Comment synchroniser au niveau temporel les occurrences d'événements dans le système réel et dans le modèle de simulation ?

Pour fonctionner, le modèle de simulation et le système réel vont échanger des informations en utilisant un mécanisme de transfert. Cet échange n'est pas instantané. Il peut introduire des retards pouvant provoquer des dysfonctionnements dans le système commandé.

D'autre part, le modèle de simulation étant mono-processeur, il n'est pas toujours "à l'écoute" du système physique. En effet, si pendant que le simulateur traite un calcul complexe, apparaît l'occurrence d'un événement, la réaction du simulateur peut se révéler trop tardive figure 3.4.

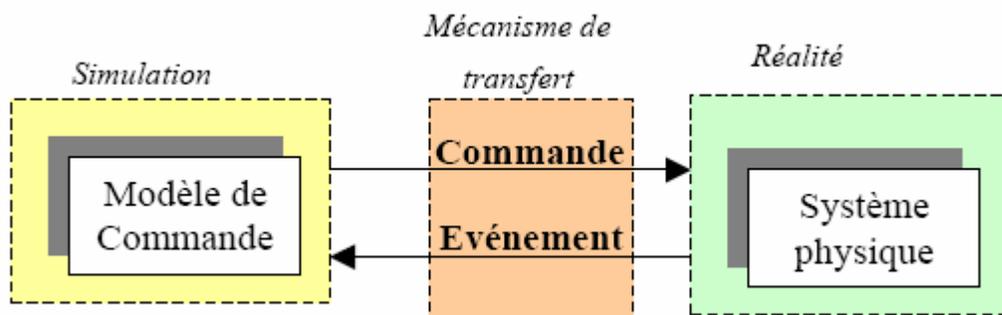


Figure 3.4. Mécanisme de transfert

### **3.3 Adopter la simulation comme un outil**

L'un des problèmes majeurs dans le processus de simulation est l'adaptation de la simulation comme un outil de prise de décision pour l'entreprise. Pour cela, Knoll et Heim [Knoll .Heim 2000] ont créé un modèle pour assurer l'adaptabilité de la simulation dans l'organisation de l'entreprise.

Le modèle implique :

- Un processus d'adoption ;
- Les facteurs de prise de décision ;
- Un capital de connaissance ;

#### ***3.3.1 Le processus d'adoption***

L'objectif du processus d'adoption est d'assurer une meilleure adaptation de l'outil de simulation au sein de l'organisation de l'entreprise, ce processus d'adoption implique quatre étapes: séparer, lier, activer et adopter.

- Dans l'état séparé il faut déterminer le potentiel de la simulation vis à vis de l'entreprise sans prendre en considération l'interaction entre eux.
- La deuxième étape exige de lier la simulation à l'entreprise par des mécanismes internes en tenant compte des objectifs prédéfinis.
- Dans l'état activé, l'outil de simulation est appliqué à un certain niveau interne de l'entreprise. Si les résultats obtenus dans cette étape sont appropriés alors on passe à la dernière étape, ou on adoptera totalement la simulation comme un outil interne à l'entreprise, si non on recommencera le processus d'adoption.

#### ***3.3.2 Facteurs de prise de décision.***

Les facteurs influençant une décision pour adopter la simulation sont :

- les avis des gestionnaires (responsables du projet),
- les avis des spécialistes,
- des références du développement du marché et la situation économique générale.

Les gestionnaires représentent les décideurs finaux. Pour prendre une décision, ils ont besoin des avis des futurs utilisateurs, de préférence des personnes ayant des notions de simulation. S'il n'y a aucune personne présente avec l'expérience demandée, un conseiller externe doit être contacté.

### **3.3.3 Capital de la connaissance.**

La réalisation d'un modèle de simulation fiable est fortement liée à la connaissance de l'outil de simulation. En effet, si on ne maîtrise pas la technologie de simulation, on ne peut pas aboutir à une adéquation de l'outil de simulation au sein de l'organisation de l'entreprise.

Ceci a comme conséquence, le besoin d'un capital de connaissance qui permet une meilleure adaptation de l'outil de simulation.

Ce capital de connaissance peut être interne, par la formation de son personnel sur la simulation, ou une connaissance externe en employant des conseillers.

### **3.4 Le pilotage par simulation**

Le pilotage de la production s'articule sur trois parties, le système physique, la planification et le contrôle et enfin le suivi de la production. Ces trois parties représentent le système générant le flux d'information. Ces informations sont récoltées le long de la chaîne de production, et la plupart d'entre elles sont stockées.

Ces informations peuvent être utilisées par le personnel de contrôle pour dépister la qualité et la vitesse de production. Elles sont également employées pour élaborer ou changer les plans de production dans le cas d'un fonctionnement anormal (arrêt d'une machine).

L'écoulement de l'information est présenté par la figure.3.5. Cet écoulement engendre un nombre élevé d'information difficile à gérer. Ainsi, la plupart des analyses de situation de production se base sur des données au hasard et les évaluations de production sont basées sur des constantes et aucune évaluation continue de la production ne peut être produite automatiquement [Randell et al, 2001].

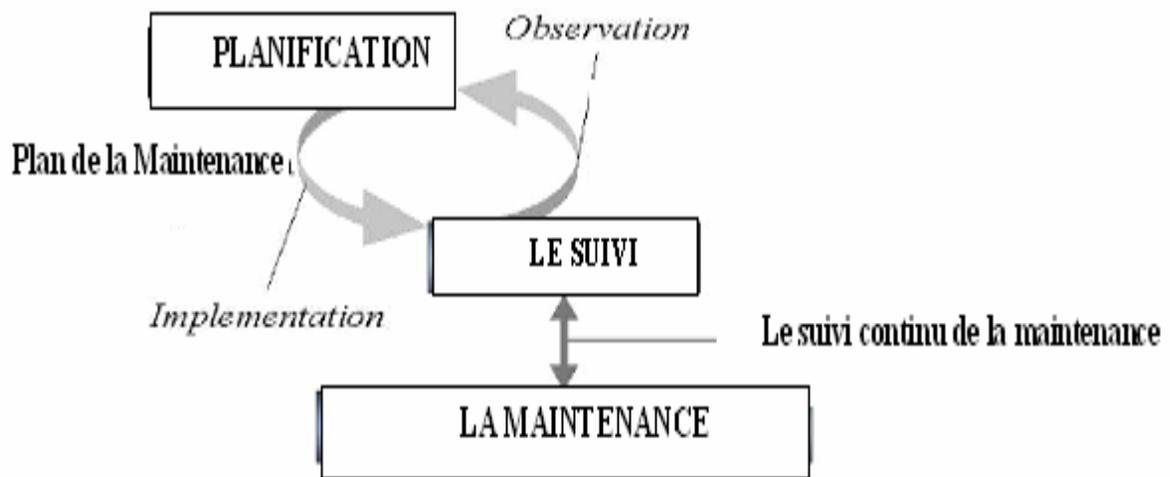


Figure 3.5 Le flux d'information sans la simulation [Randell et al, 2001]

Avec la simulation, l'écoulement continu des données du système est employé pour estimer des situations de production. La situation actuelle, les données historiques et les plans de production sont traités dans le simulateur. Les résultats peuvent alors être utilisés pour concevoir de nouveaux itinéraires de production et ainsi choisir la solution adéquate.

L'écoulement de l'information avec la simulation est présenté sur la figure 3.6.

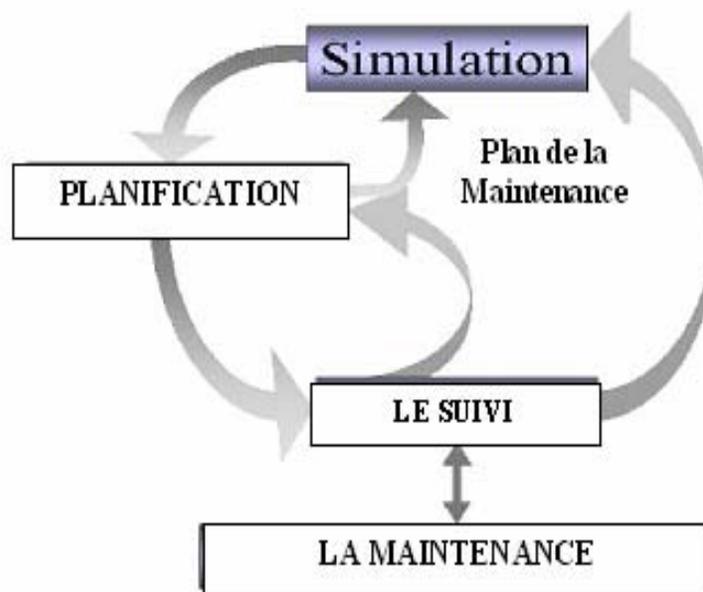


Figure 3.6. Le flux d'information avec la simulation [Randell et al, 2001]

Pour mettre en exergue l'apport de la simulation en pilotage, nous considérons l'évaluation des produits dans un entrepôt à un moment donné. Actuellement, les évaluations se basent sur des estimations constantes, aussi bien, des vitesses des machines que du temps de transfert. Ceci signifie qu'aucune tendance ne peut être suivie et qu'aucune variable ne peut être prise en considération, puisque les évaluations sont constantes et n'emploient aucune variable stochastique, alors aucun véritable intervalle de confiance ne peut être formé. C'est une limitation importante pour faire des estimations des temps de production. Avec la simulation, un certain nombre de variables peuvent être utilisés pour donner de meilleures évaluations de même que pour les intervalles de confiance. La figure 3.7 représente l'évaluation d'une situation fictive de production dans un système de production. Avec les systèmes ordinaires, l'évaluation de la production est seulement basée sur l'historique, représenté par un trait horizontal. Avec la simulation, des tendances peuvent être suivies en tenant compte des événements historiques et des variables de changement du système. En outre des intervalles de confiance sont créés avec le simulateur pour proposer plusieurs solutions.

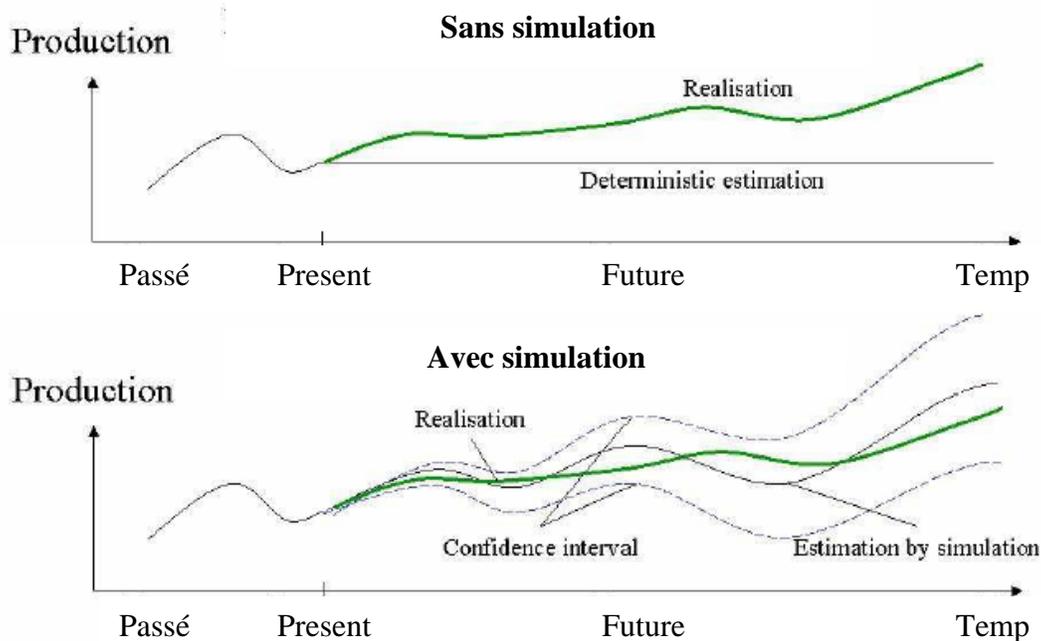


Figure 3.7. Estimation de la production avec et sans simulation

### 3.5 Conditions de succès de coopération entre pilotage et simulation

Pour arriver à une coopération réussie entre la simulation et le pilotage, il faut remplir quelques exigences, que se soit pour le système à piloter ou pour le logiciel de simulation.

Tout d'abord le système d'information du service simulé doit pouvoir fournir une vision de la situation globale du système de production à tout moment, en mettant à jour une base régulière de donnée. La base de données doit être flexible et facile à accéder. En conclusion, le système d'information doit pouvoir produire des rapports qui peuvent être utilisés par le simulateur.

La dernière condition est qu'il doit avoir une coopération sans bornage entre le logiciel de simulation et le système d'information externe. Le simulateur doit pouvoir gérer l'information de la source sans tarder et recevoir l'information suivant le format dont il a besoin. Ceci peut être fait par l'implémentation d'un système d'échange de donnée.

### **3.6 Démarche d'utilisation de la simulation pour pilotage [Claire 2000]**

La mise en oeuvre d'une simulation comprend les étapes suivantes:

#### **3.6.1 Analyse du système à étudier et formulation du problème**

Dès la conception, il faut analyser le système, déterminer les « étapes-clé » du processus que nous souhaitons étudier, définir les objectifs, et poser des questions du type « comment » :

- dimensionner l'atelier ?
- organiser l'atelier ?
- gérer le flux de produits ?
- gérer les ressources ?
- piloter la production en temps réel ?

#### **3.6.2 Collecte des données nécessaires à la simulation**

- **les données physiques** : il faut cerner l'organisation du système, avec le nombre de machines, d'opérateurs, de chariots, les temps d'ouverture, le partage des ressources, le nombre de produits, leur type, leur gamme,...;
- **les données de gestion** : le carnet de commandes, les quantités commandées, les tailles des séries, les dates, les types de flux (poussé, tiré, tendu, kanban, ...).
- **les données de pilotage** : les règles d'ordonnancement et de priorité, les aléas de fonctionnement (pannes, absentéisme, dérèglage, règles de facteurs maîtrisables, ...) avec la manière de les repérer (indicateurs de performance) et les règles de décision, les plans d'action correspondants, les règles d'usure des outils, ...

### 3.6.3 Construction du modèle de simulation

Cette étape a pour objectif de construire le modèle sur la base duquel va s'effectuer la simulation. Il s'agit de retranscrire la réalité sous forme de modèle compréhensible par les utilisateurs. Ce modèle peut être sous forme graphique, sous forme de schéma, ...

### 3.6.4 Vérification et validation du modèle

La vérification, c'est avoir le modèle « bon », c'est-à-dire, fiable dans ses données (par exemple :  $1+1=2$  !)

La validation du modèle, c'est avoir « Le bon » modèle, c'est-à-dire reflétant au mieux la réalité.

La vérification peut s'effectuer par différents tests avec, pour commencer, des données en entrée et en sortie déjà connues. La validation du modèle peut également s'effectuer par la simulation de cas d'abord communs, puis de cas particuliers déjà connus, pour vérifier par exemple que le modèle de simulation a bien reflété le fonctionnement du système réel.

### 3.6.5 Définition des expériences à effectuer

On définit les conditions d'utilisation du modèle, la stratégie (nombre d'expériences, durée, plans d'expérience, ...) et la tactique (conditions initiales, types de résultats, ...).

### 3.6.6 Simulations et enregistrement des résultats

Après chaque simulation, les résultats sont enregistrés avant leur analyse.

### 3.6.7 Evaluation des performances, interprétation des résultats, et recommandations

L'analyse personnelle des résultats est possible à l'aide des indicateurs de performance sous forme de tableaux, courbes, graphiques, histogrammes, ... Le recours à des outils d'analyse statistiques est parfois nécessaire (analyse de la variance). Cette interprétation permet soit

- **dans le cas de résultats non satisfaisants**, d'émettre des recommandations, comme la remise en question des paramètres ou le cas échéant, des objectifs [Habchi *et al.* 96]. Dans ce cas, ces recommandations (hypothèses de plan d'action) sont encore à tester et donc à réintroduire dans le modèle de simulation. Il faut ensuite à nouveau effectuer une simulation avec ce nouveau paramétrage, et cela, jusqu'à satisfaction des résultats.
- **dans le cas de résultats satisfaisants** : mettre en oeuvre les plans d'action sur le système réel (nous passons alors à l'étape suivante).

### 3.6.8 Mise en œuvre des plans d'action sur le système réel

Les plans d'action, suite aux divers tests sont à appliquer sur le système réel en fin de simulation, lorsque les différents acteurs-décideurs sont d'accord sur les résultats et sur le choix d'application. Cette application s'effectue toujours en se référant aux différentes simulations qui ont dû être documentées.

Le cycle de cette démarche d'utilisation de la simulation n'est donc pas linéaire. Le schéma de la figure 3.8 illustre la façon dont ces différentes étapes s'articulent dans la pratique classique.

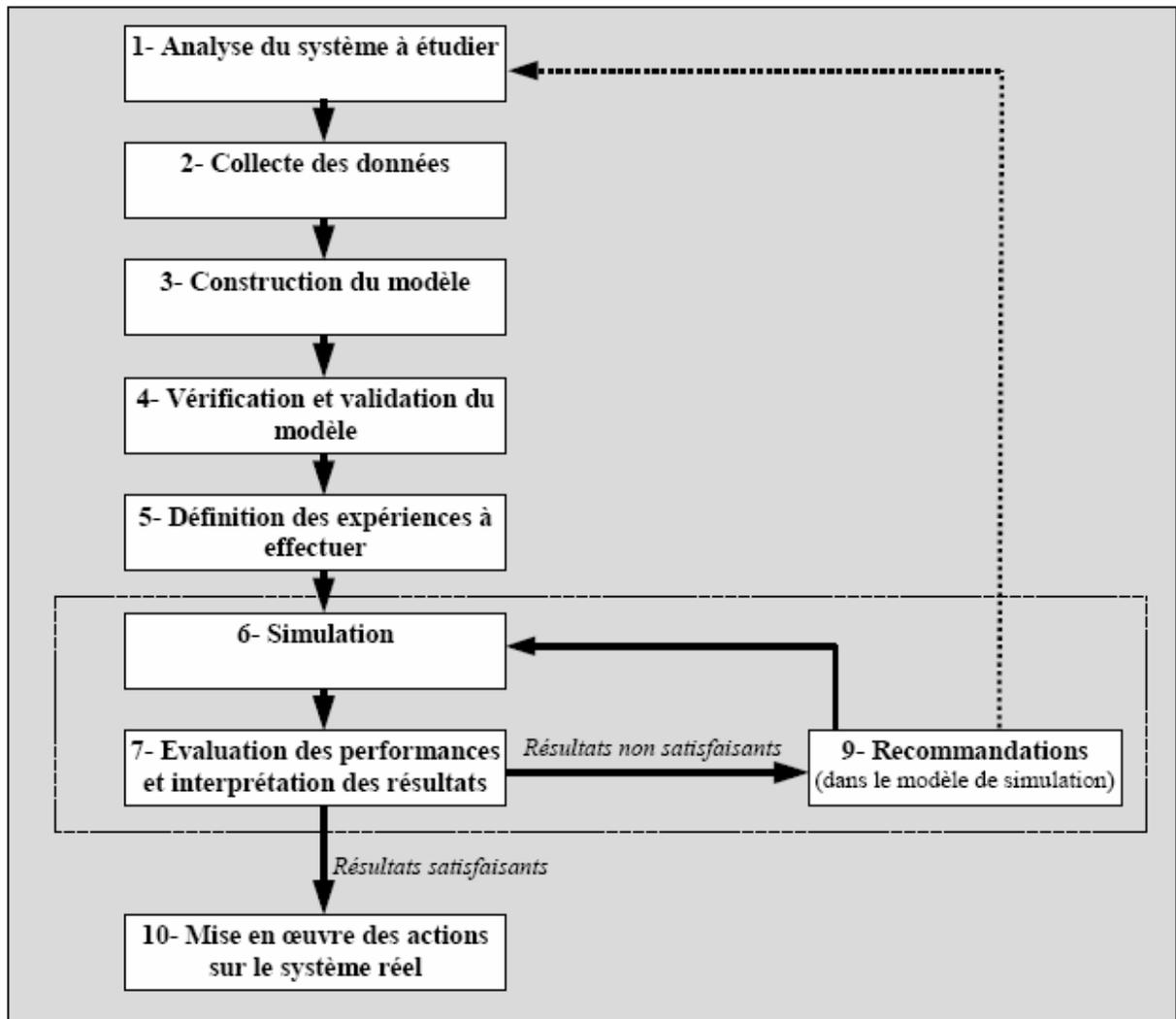


Figure 3.8. Processus d'utilisation de la simulation [Claire 2000]

### **3.7 Conclusion**

Depuis une vingtaine d'années l'évolution des méthodes, techniques et outils de pilotage a été importante. Elle s'accélère ces dernières années pour s'adapter aux nouveaux outils de communication. Pourtant, leur diffusion reste limitée, presque confidentielle. Il est vrai que de nombreuses barrières s'opposent à une large diffusion. Ce déficit provient en partie de la communication. L'utilisateur se trouve confronté à des lois ou à des applications et outils qui nécessitent un effort de transposition souvent complexe.

De ce fait, et pour maîtriser le processus de production il faut se donner les moyens de vérifier les conditions de sa mise en oeuvre, de mesurer les écarts par rapport à la description qui en a été faite et bien sûr de fixer des objectifs d'amélioration en fonction des dysfonctionnements constatés mais aussi des objectifs d'amélioration de la qualité et de la productivité.

Dans ce chapitre nous avons exprimé l'ampleur de la simulation comme outil d'aide et montré qu'elle s'adapte bien à la représentation et à l'analyse des systèmes de production. Cependant, cet outil est rendu difficile par la multiplicité des contextes, la différence d'ampleur des systèmes de production, des enjeux et la variété des thèmes à piloter. C'est la prise en compte de ces contraintes sur laquelle il reste à progresser.

---

***Etude de cas***  
*Application à l'entreprise*  
*ERIAD Batna*

---

Une étude expérimentale avec le but de produire un modèle de simulation d'un moulin à blé a été réalisée afin d'exposer le concept de pilotage par simulation.

### 4.1 Méthodologie de travail

Après que les informations ont été collectées au sein de l'entreprise, elles sont employées pour créer le modèle de simulation. Chaque entité est créée et baptisée du nom des entités correspondantes dans la base de données de l'entreprise. Les entités sont reliées selon le cheminement de la production. Puisque plusieurs itinéraires peuvent exister, la logique de cheminement est complétée avec la logique de fonctionnement des entités.

Une fois que la situation courante a été classée dans le modèle de simulation, le simulateur est prêt à être utilisé afin de prévoir le comportement du système de production réel.

Les résultats de simulation sont enregistrés dans la base de données propre du simulateur. Ses résultats sont utilisés afin d'établir un diagnostic sur la situation réelle et prévue pour la production, pour déterminer les écarts et essayer de proposer des solutions qui seront à leur tour intégrées dans le modèle de simulation afin de vérifier leurs validités (figure 4.1).

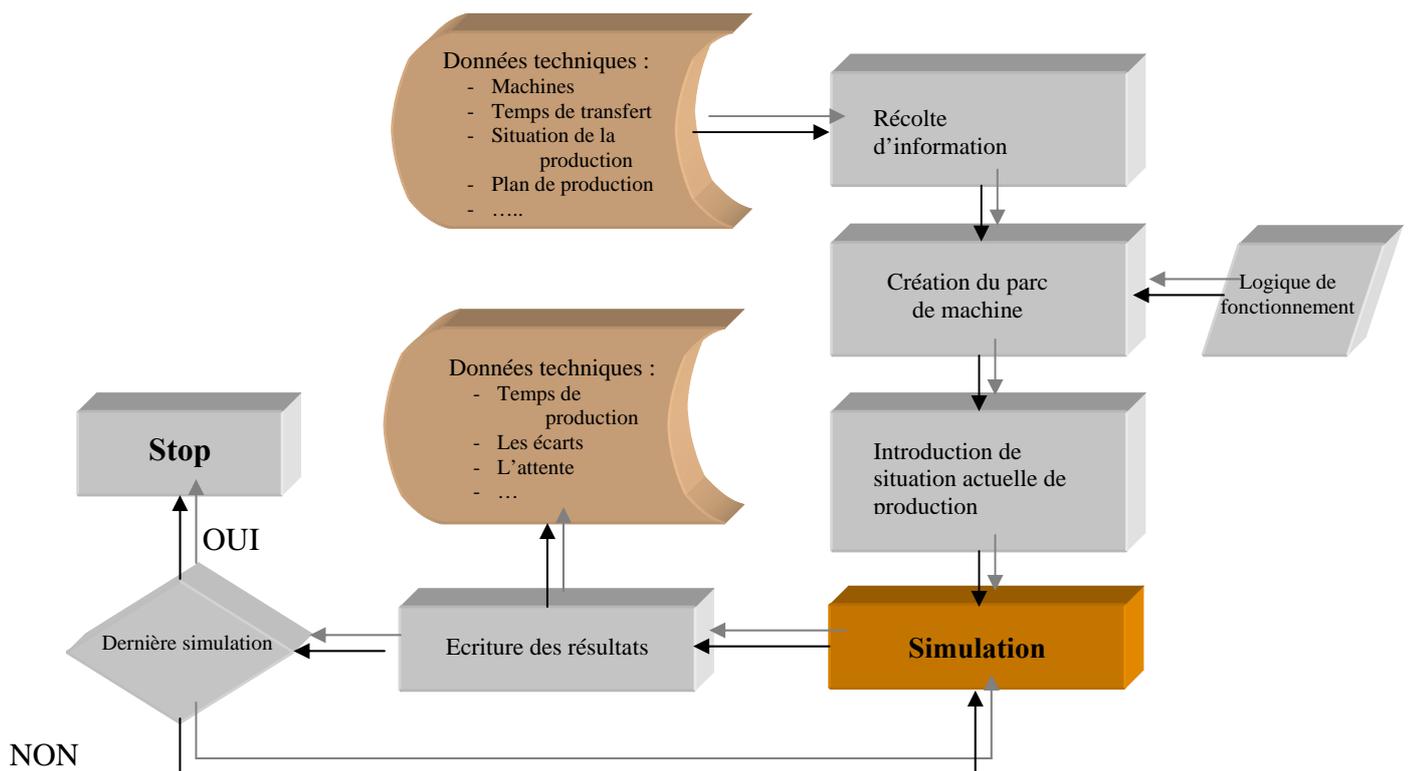


Figure.4.1 Méthodologie de travail

Le champ d'application dans notre cas est l'entreprise « ERIAD » "L'entreprise des industries Alimentaires céréalières et Dérives " Batna.

Suivant une démarche pragmatique qui se scinde en trois étapes. La première a consisté à présenter le processus de fabrication de l'entreprise. Aussi, nous avons modélisé le processus de

production de l'entreprise par RdP hybride, Ensuite, dans une seconde étape, nous avons procédé à une simulation de ce dernier par l'utilisation du logiciel SIMUL8, enfin et vu les résultats de simulation obtenus, certaines modifications, que nous estimons importantes et permettant des améliorations du système sont proposées.

## **4.2 Présentation de l'entreprise cible**

La branche des Industries Agroalimentaires occupe une place stratégique au sein de l'économie et ce compte tenu de son objectif principal qui vise la satisfaction des besoins essentiels de la population.

A titre d'illustration des besoins de la population algérienne, la consommation annuelle par capital est de 200 Kg d'équivalent céréales, 28 Kg de sucre et 13 Kg d'huile.

L'importance de ces besoins fait aussi que l'Algérie est le premier importateur mondial de blé dur et parmi les dix premiers pays importateurs pour les autres produits alimentaires.

### **4.2.1 Historique :**

L'entreprise des industries alimentaires céréalières et dérivées de Batna est un mixte de semouleries, minoteries.

L'unité est située au nord de la ville de Batna et s'étend sur une surface de 4400 m<sup>2</sup> ; ce lieu d'implantation a été choisi pour faciliter l'approvisionnement en matière première.

L'entreprise a été créée par ordonnance N° 65-89 du 25/03/1965, modifiée et complétée par l'ordonnance N°69-99 du 26/04/1968. La construction du moulin a été réalisée clé en main en 1973, date de sa première année d'essai.

En 1982, l'entreprise a été restructurée, ce qui a donné naissance à L'entreprise des Industries Alimentaires Céréalières et Dérivées ERIAD.

### **4.2.2 Effectif :**

L'effectif total de l'unité s'élève à : 180 agents répartis comme suit :

117 → La production.

32 → Soutien (Maintenance, approvisionnement et hygiène et sécurité).

31 → Administration.

### **4.2.3 Production de l'unité :**

L'unité ERIAD de Batna est une entreprise Agroalimentaire, sa vocation première est la transformation des blés en produits finis (semoule et farine) destinés à la consommation, cette activité consiste à faire subir un processus technologique au blé à savoir trituration (mouture).

Les productions réalisées par ERIAD durant l'année 2005 sont données par la **figure 4.2** :

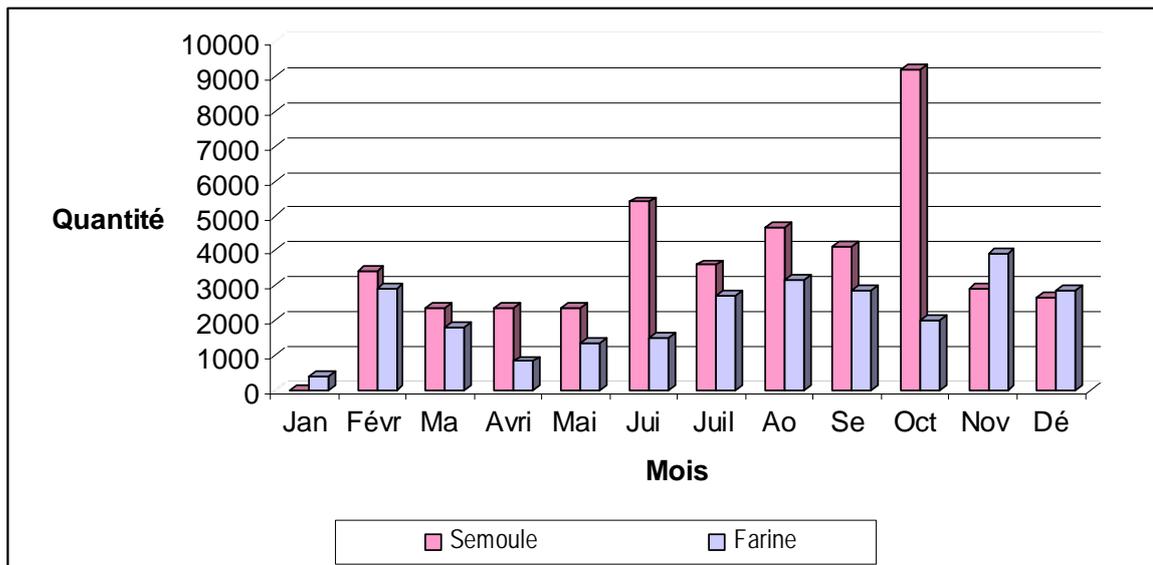


Figure.4.2. La production de semoule et de la farine.

Remarque :

✚ Blé dur → Production Semoule.

✚ Blé tendre → Production Farine.

Ce processus est réalisable par le passage du blé à travers trois phases. Chacune d'elles est caractérisée par une tâche bien précise.

Les trois phases importantes sont :

- Réception : elle détermine la nature et la quantité du produit reçu.
- Nettoyage : Le blé subit l'opération de nettoyage pour éliminer toutes les particules végétales, minérales, etc.
- Mouture : La mouture est la dernière phase pour l'obtention des produits finis.

### 4.3 Processus de transformation du blé

Les minoteries ont pour tâche de transformer les céréales en farines de qualité moyennant un taux d'extraction aussi élevé que possible. Les produits secondaires et résidus (son, farines basses et issues) sont récupérés par l'industrie des aliments pour le bétail ou par l'agriculture. Par ailleurs, les minoteries fournissent également des denrées dites "complètes".

Dans les minoteries, l'eau utilisée pour le conditionnement (mouillage) des céréales est entièrement absorbée par les grains. Aujourd'hui, toutes les opérations de nettoyage se font par systèmes pneumatiques, tamis et trieurs. Les laveuses ont été en grande partie remplacées par des brosses ou époinçuses, qui ne produisent pas d'eaux résiduaires.

Le schéma ci-après (figure 4.3) permet d'identifier les différents secteurs d'une minoterie moderne.

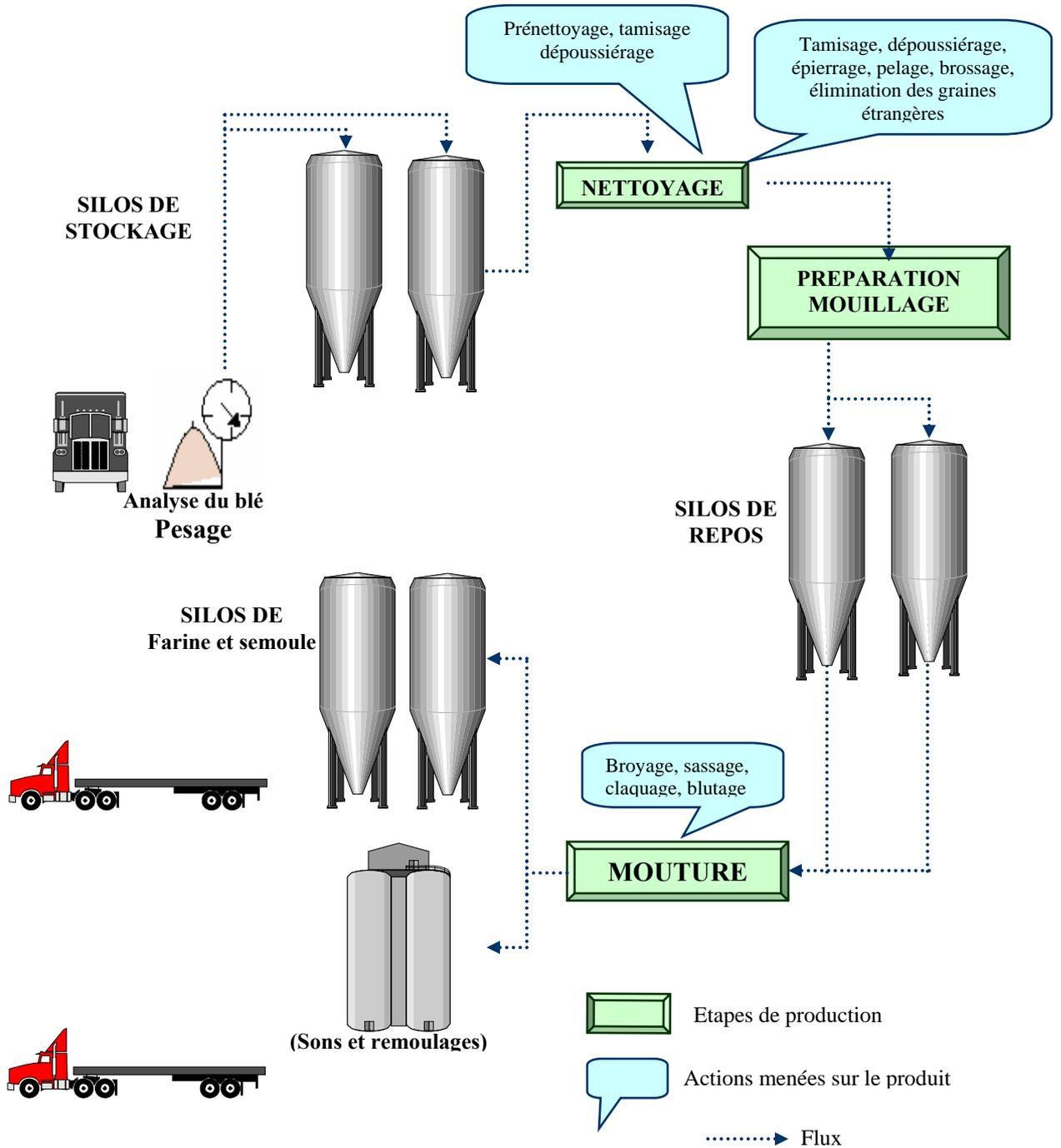


Figure.4.3 Secteurs d'une minoterie

Ainsi, le cycle de transformation est résumé comme suit (Figure 4.4) :

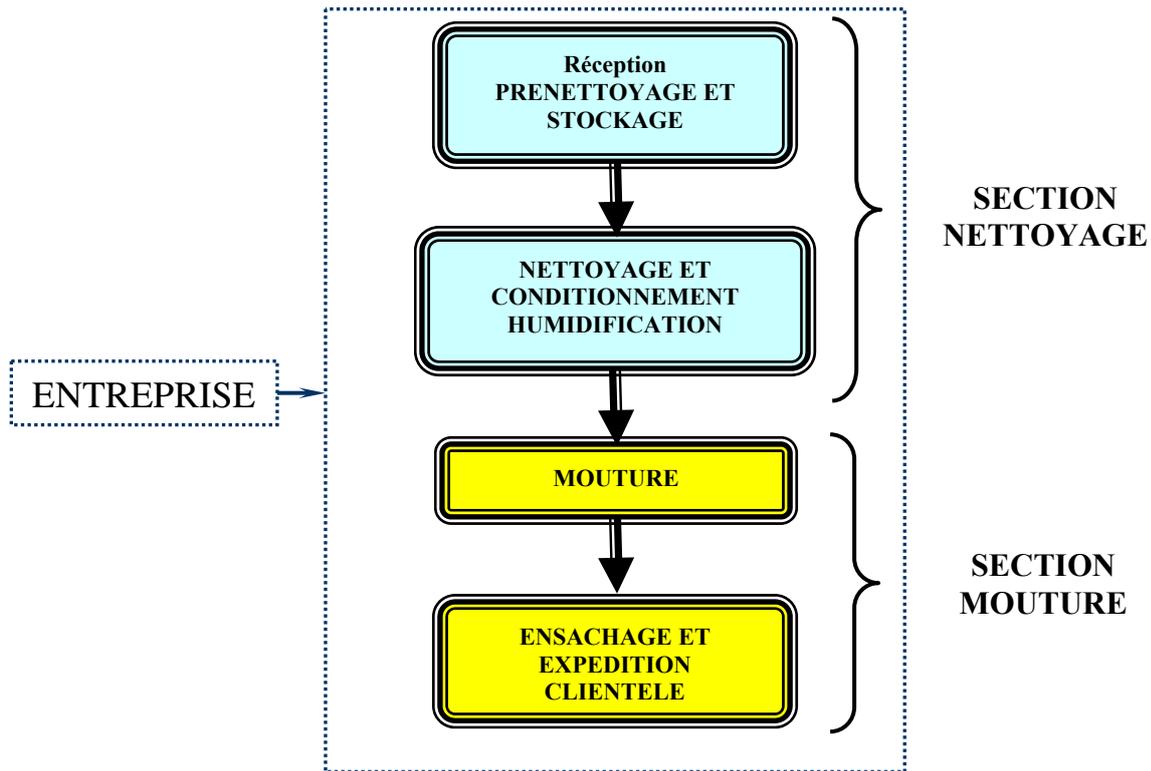


Figure.4.4 Cycle de fabrication

## 4.4 Description du processus de transformation

### 4.4.1 LE NETTOYAGE :

Le pesage se déroule sur un pont à bascule. Après la pesée, un échantillon du chargement est prélevé afin d'être analysé. On cherche, par cette opération, à évaluer la qualité du blé par la détermination de certaines caractéristiques telles que la teneur en eau, le taux d'impuretés, le poids Spécifique (PS) ou la teneur en protéines. La cargaison sera déchargée dans le cas où le blé livré correspond aux engagements figurant sur le cahier de charges. Si tel est le cas, la mise en silos pourra s'effectuer ainsi que le nettoyage des grains.

La mise en silos crée un important dégagement de poussière. Celle-ci est aspirée et éliminée à l'aide d'appareils tels que l'épailleuse ou le tarare. C'est la première phase de nettoyage du blé. Puis différents appareils vont retirer toute la poussière, les débris de roches, de graines, de pailles ainsi que des métaux ferreux qui peuvent encore s'y trouver (figure 4.5). Il ne reste, une fois ces opérations terminées, plus qu'à mouiller les grains de blé afin de faciliter le retrait du son, enveloppe qui protège l'amande, principal élément servant à la fabrication de la semoule et la farine. Pour cela, on fait monter le taux d'humidité des grains à 14.5% environ.

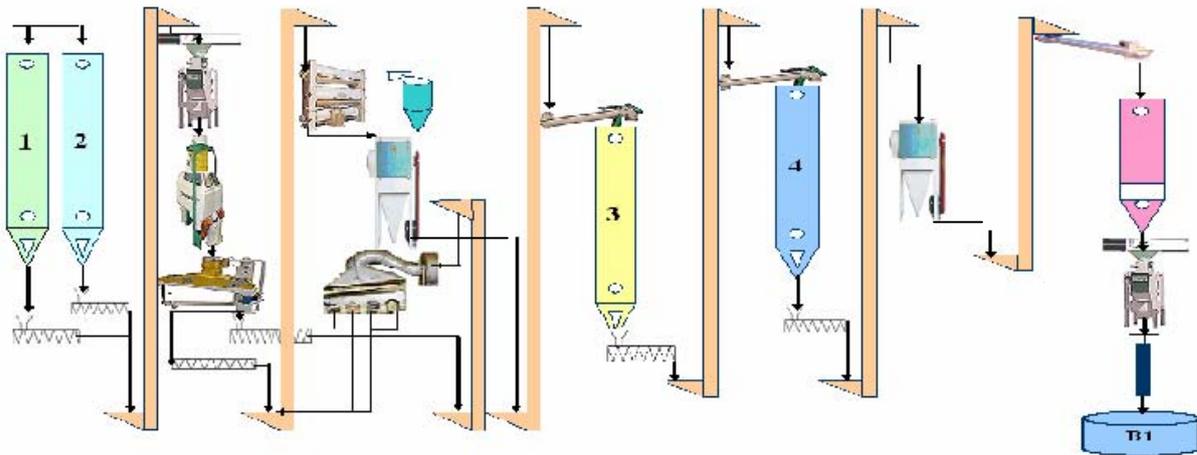


Figure.4.5. Processus de production, partie nettoyage

#### 4.4.2 LA MOUTURE :

L'organisation de la mouture s'appuie sur trois lignes d'appareils à cylindres.

La ligne BROYAGE, qui doit réaliser la séparation entre les enveloppes du grain et de l'amande. Le nombre de passages peut suivant le débit aller de quatre à cinq passages, avec des appellations possibles de gros et de fins.

La ligne CLAQUAGE, qui réduit normalement l'ensemble des semoules. Le nombre de passages peut suivant le débit aller de trois à cinq.

La ligne CONVERTISSAGE, qui réduit les finots provenant du broyage et les gruaux qui eux, proviennent du claquage. Le nombre de passages peut suivant le débit aller de cinq à sept.

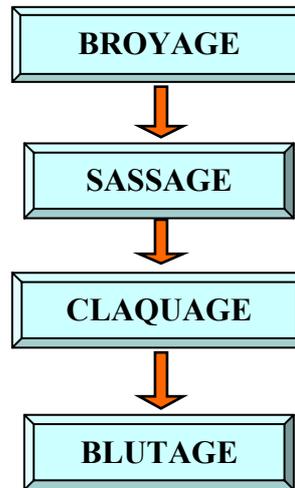
Dans chacune de ces lignes, il existe une distinction entre les passages de tête et les passages de queue. Cette distinction tient compte des aspects quantitatifs et qualitatifs des produits.

Chaque passage de broyage, claquage, convertissage, est suivi d'un calibrage. Cette opération consiste à séparer granulométriquement les produits dans des machines spécifiques appelées plansichters. Chaque compartiment est un ensemble de tamis superposés.

Il existe trois catégories de tamis : les tamis à refus (leurs refus alimentent les broyeurs), les tamis de divisions (leurs refus alimentent les claumeurs), les tamis à farine (leurs refus alimentent les convertisseurs).

Le produit obtenu après passage entre les cylindres (qui n'est pas encore tamisé) s'appelle la boulangue.

Les principales étapes pour la production aussi bien de la farine que de la semoule sont données par la figure 4.6.



**Figure.4.6.** Processus de production, partie mouture

Pour l'entreprise ERIAD Batna, et afin de mieux représenter le processus de mouture. On a schématisé le processus de mouture on présentant les différents équipements de mouture (figure 4.7)

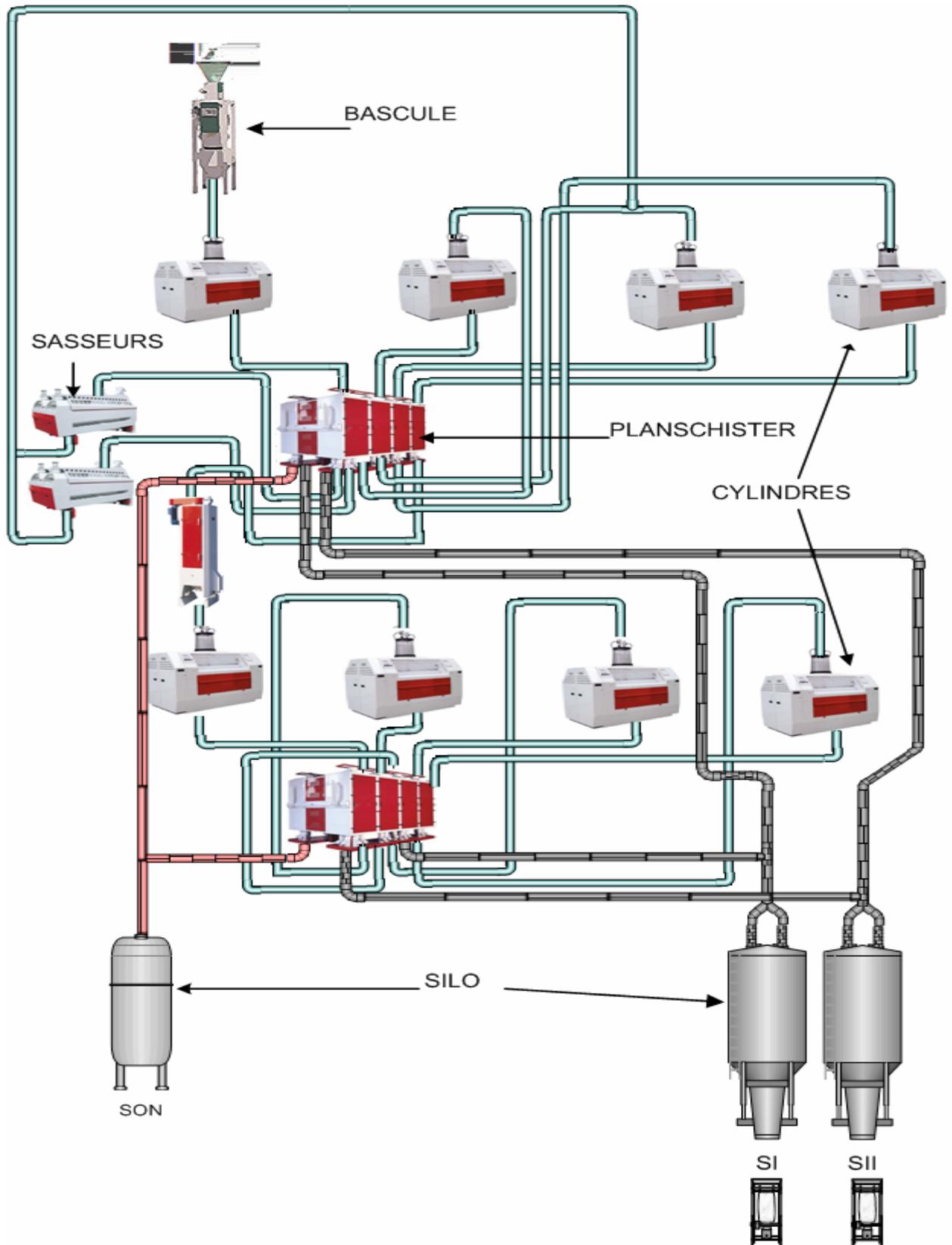


Figure.4.6. "Schéma d'installation, partie mouture

#### 4.4 Analyse du système de production

Selon Habchi [Habchi 01], nous pouvons décomposer le système de production en deux sous-systèmes : le **système de fabrication** et le **système de pilotage** (figure 4.7).

1. Le **système de fabrication** est composé de deux types d'objets principaux : les **ressources** et les **entités**. Les ressources représentent les moyens de production mis en place à disposition du flux physique (entités). Elles comprennent des ressources dites « *actives* » telles que les machines, les opérateurs, les systèmes de transferts... et des ressources dites « *passives* » telles que les stocks, les palettes, les outils... Les entités forment le flux physique. Elles comprennent les composants, les pièces, les lots, les ensembles, les produits...
2. Le **système de pilotage** est composé d'unités pilotantes ou décisionnelles. Le pilotage exprime les **relations** qui existent entre acteurs décideurs, ressources, entités... Ces relations correspondent à deux types de règles : les **règles de précédence** données par les gammes, les nomenclatures... et les **règles de gestion** données par la définition des priorités, la gestion des aléas, l'ordonnancement... Les règles de précédence (gammes et nomenclatures) définissent la manière selon laquelle le flux physique traverse les ressources (logique d'enchaînement opératoire). Ces règles sont de nature statique, elles sont affectées aux entités. Généralement, elles ne changent pas dans le processus de fabrication et sont définies a priori (sauf dans le cas de choix de gammes alternatives). Par contre, les règles de gestion sont de nature dynamique. Elles évoluent dans le temps en fonction de l'état des ressources dans le processus de fabrication. Ces règles sont affectées aux ressources car, généralement les actions mises en place sont réalisées sur les ressources pour améliorer la performance du processus de production.

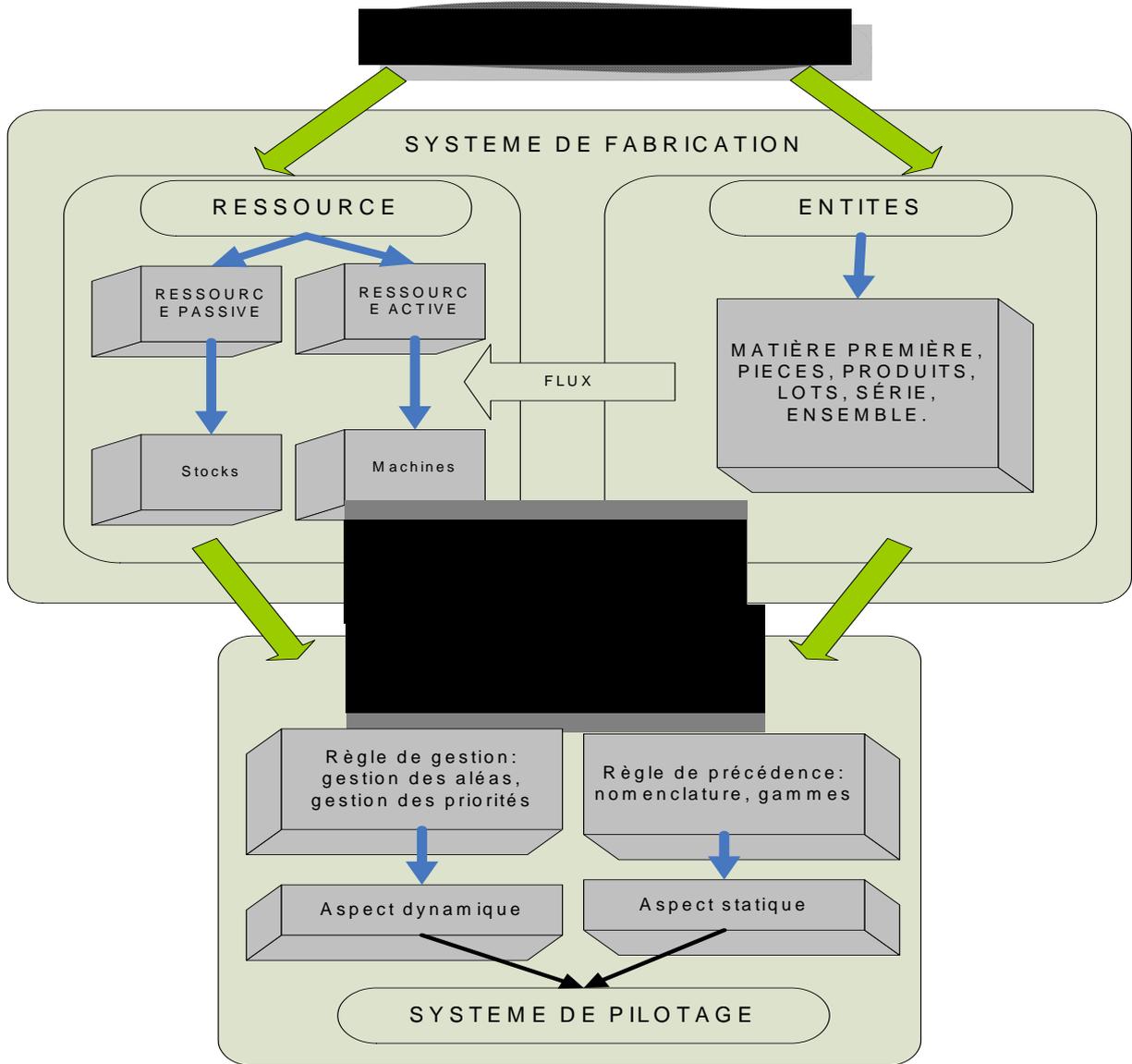


Figure.4.7. Système de fabrication système de pilotage [habchi 01]

Afin d'étudier le système de production de l'entreprise cible, il faut étudier les deux sous-systèmes (système de fabrication, système de pilotage), pour cela, on a eu recours à des outils permettant la description et l'analyse de ses sous systèmes, ces outils été choisi selon les caractéristiques de chaque sous système. Pour le système de fabrication, il fallait utiliser un outil permettant la description fonctionnelle du système en déterminant ses caractéristiques structurelle, notre choix c'est porté sur les réseaux de petri (RdP), par contre pour le système de pilotage il fallait utiliser un outils permettant la description de l'aspect décision au sein du système fabrication et démontrer les relation entre le sous-système de fabrication et le sous-système de pilotage, l'outil utiliser est les réseaux STP-CP

## 4.5 Modélisation du sous-système de fabrication de l'entreprise

Modéliser est une démarche intellectuelle et scientifique qui permet de comprendre un système complexe en créant un modèle (souvent un dessin formel) qui reproduit la réalité et qui est compréhensible par tous.

Le mode de fonctionnement du processus de production a imposé sa modélisation par un **RdP hybride**.

### 4.5.1 Modélisation de la partie Nettoyage

Le principe de modélisation dans cette partie consiste à représenter chaque élément dans le processus de nettoyage par une place, que ce soit les équipements intervenant directement dans le processus ou les moyens de stockage tel que les silos, il faut noter que les équipements de soutiens n'ont pas été pris en considération dans le modèle.

Les informations retenues dans le modèle ont été la vitesse de fonctionnement pour les équipements et la capacité de stockage pour les silos.

Le modèle RdP hybride du système de nettoyage est donné par la **figure 4.8**.

#### • Identification des différentes places et transitions :

P1 : Silo de blé local.

P2 : Silo de blé importé.

P3, P23 : Balance.

P4 : Séparateur.

P5 : Stock de sable.

P6 : Stock de déchets.

P7 : Epierreur.

P8 : Vis sans fin.

P9 : Table densimétrique.

P10 : Stock de son.

P11, P14, P20 : Elévateur.

P12 : Batterie.

P13 : Epoinçuse à sec.

P15, P17, P21 : Vis mouilleuse.

P16, P18 : cellule de repos.

P19 : Epoinçuse humide.

P22 : Boisseau.

P24, P25 : mouilleur.

P26 : Mouilleur de correction.

- T : {T1, T2, T3, T4, T5, T6, T7, T8, T9, T10, T11, T12, T13, T14, T15, T16, T17, T18, T19, T20, T21, T22} Fonctionnement de chaque opération.
- U : {u1, u2, u3, u4, u5, u6, u7, u8, u9, u10, u11, u12, u13, u14, u15, u16, u17, u18, u19, u20, u21, u22} vitesse de chaque équipement (donnée par l'entreprise).

**Remarque:**

La quantité de blé lancée (importé et local) dans les silos (P1, P2) est de : **21 tonnes**.

La quantité d'eau ajoutée est : 5% d'eau pour une tonne de blé.

- **Explication des différents pourcentages :**

Les différentes valeurs ont été fournies par l'entreprise

<i>POURCENTAGE</i>	<i>EXPLICATIONS</i>
0.25	25% blé local
0.75	75% blé importé
0.002	0.2% sable
0.004	0.4% grand déchets
0.994	99.4% blé propre
0.04	4% blé propre
0.002	0.2% pierres
0.957	95.7% blé plus propre
0.05	5% son
0.008	0.8% blé propre
0.942	94.2% blé plus propre
0.095	9.5% son
0.905	90.5% blé parfait
0.03	3% d'eau
0.02	2% d'eau
0.01	1% d'eau
1.03	100% blé plus parfait + 3% d'eau (1er mouillage).
1.02	100% blé plus parfait + 2% d'eau (2ème mouillage).
1.01	<b>100% blé plus parfait + 1% d'eau après le mouillage</b>

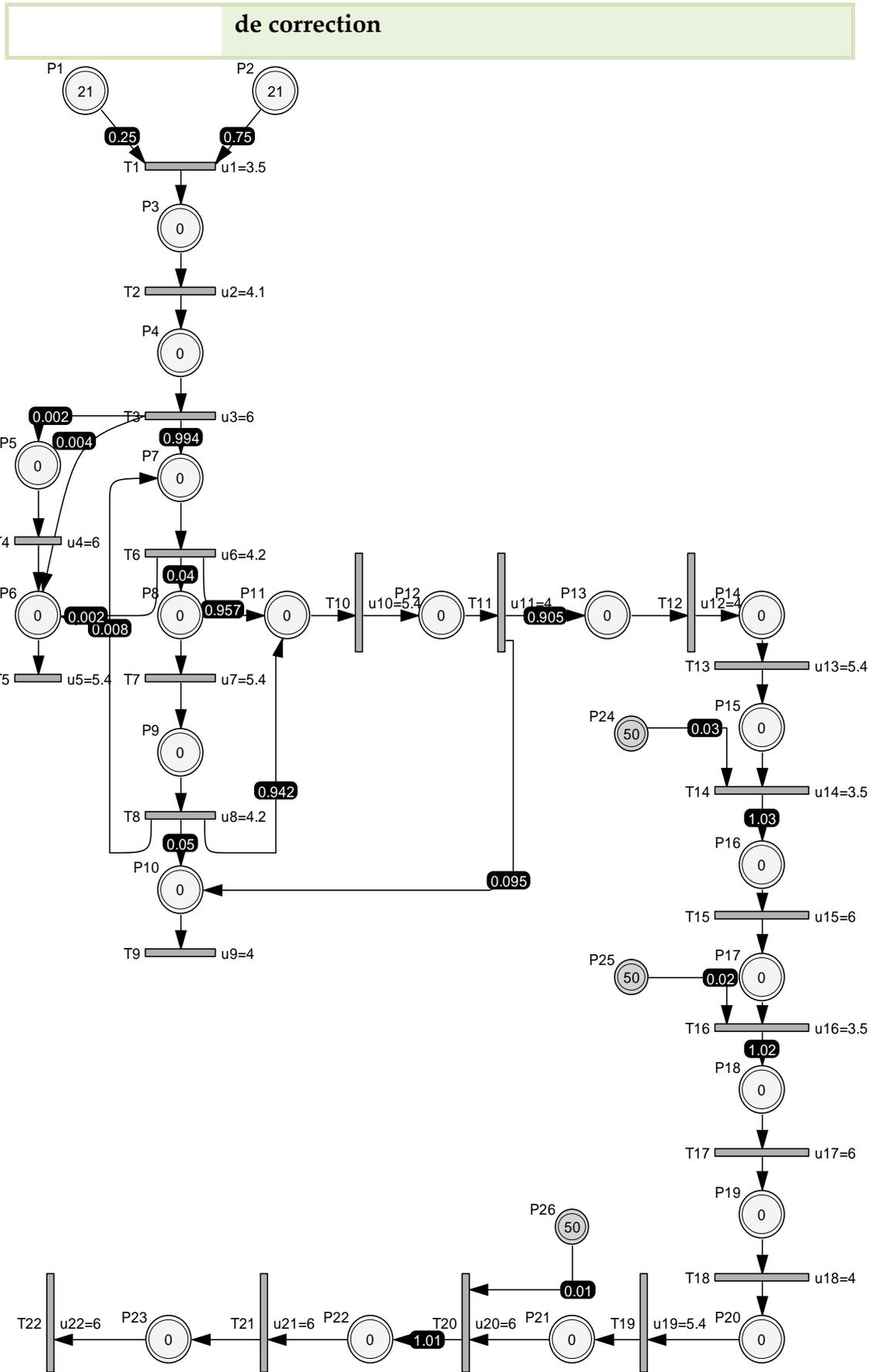


Figure 4.8. Modèle RdP du système de nettoyage

#### 4.5.2 Modélisation de la partie Mouture

Pour la partie mouture, on a gardé le même principe de modélisation que pour la partie nettoyage, la seule différence réside dans les PLANSCHISTER. Les PLANSCHISTERS sont des équipements qui possèdent quatre armoires et pour chaque armoire il y a un nombre spécifique de tamis pour assurer les opérations de sassage, claquage et blutage, ces armoires travaillé de manière distingue pour cela on a représenté chaque armoire par une place suivit par une transition que représente la vitesse de fonctionnement qui est identique pour toutes les armoires.

La deuxième caractéristique des PLANSCHISTERS et qu'ils possèdent plusieurs sorties, cela nous a imposé d'utilisé les arcs généraux afin de représenter le pourcentage d'extraction pour chaque armoires.

La **figure 4.9** représente le modèle RdP de la partie Mouture d'ERIAD

- **Identification des différentes places et transitions :**

P1 : Balance.

P2, P3, P5, P8 : Cylindre type B.

P4, P6, P7, P9 : Armoires du premier PLANSCHISTER.

P20, P21, P17, P19 : Cylindre type C

P13, P14, P15, P16 : Armoires du deuxième PLANSCHISTER.

P22, P23 : Sasseur.

P18 : Brosse.

P10 : Silo SEMOULE I.

P11 : Silo SEMOULE II.

P12 : Silo son.

- T : {T1, T2, T3, T4, T5, T6, T7, T8, T9, T10, T11, T12, T13, T14, T15, T16, T17, T18, T19, T20, T21} Fonctionnement de chaque opération.

- U : {u1, u2, u3, u4, u5, u6, u7, u8, u9, u10, u11, u12, u13, u14, u15, u16, u17, u18, u19, u20, u21, } Vitesse de chaque equipement (donnée par l'entreprise).

- Explication des différents pourcentages :

Les différentes valeurs ont été fournies par l'entreprise

POURCENTAGE	EXPLICATIONS	
0.3	30% Semoule I	Armoires du premier PLANSCHISTER.
0.3	30% Semoule II	
0.07	7% Son	
0.6	60% Semoule I	Armoires du deuxième PLANSCHISTER
0.35	35% Semoule II	
0.05	5% Son	
0.45	45% Pourcentage de refus	Armoires du premier PLANSCHISTER
0.25	25% Pourcentage de refus	Armoires du deuxième PLANSCHISTER

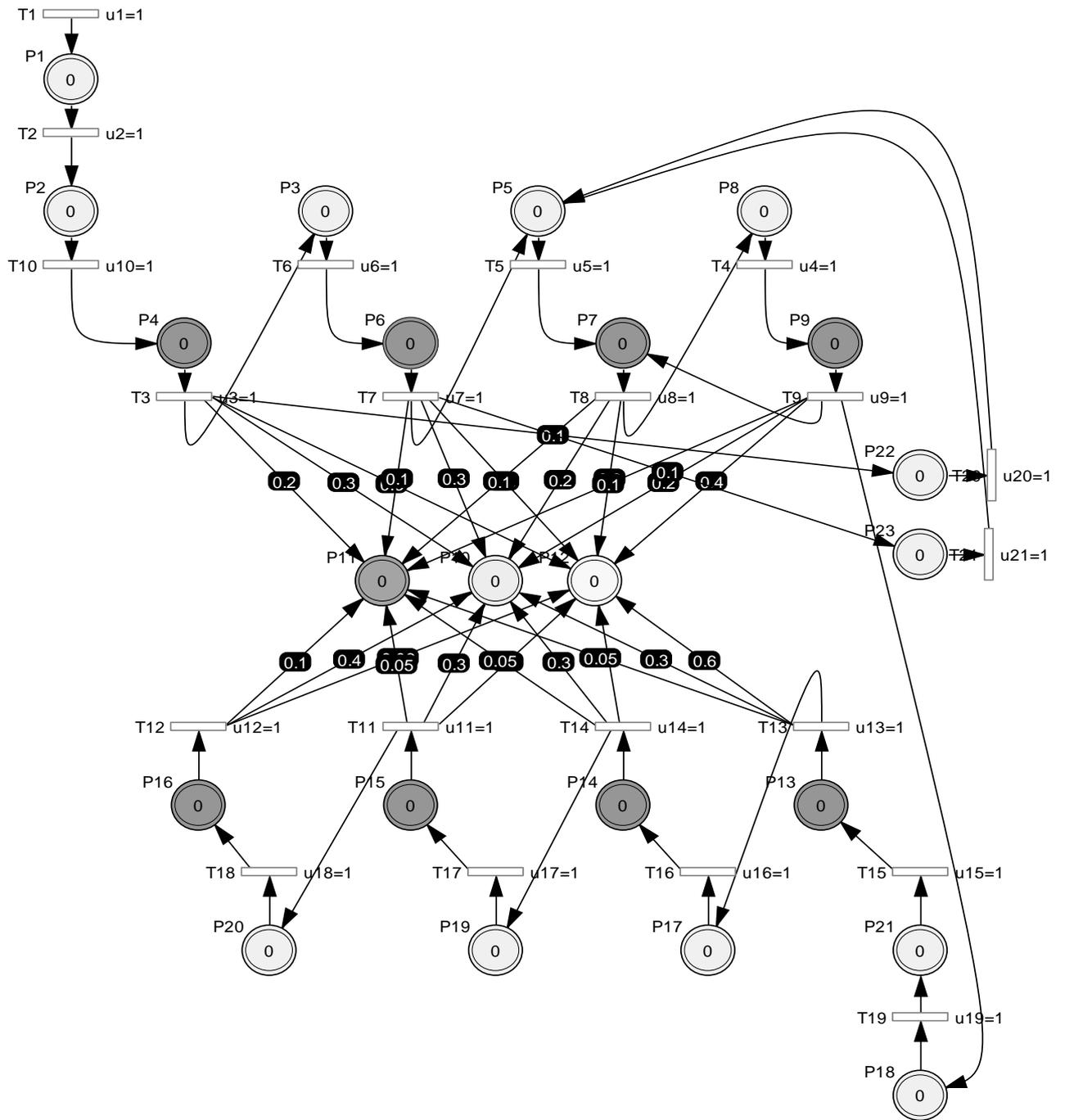


Figure 4.9. Modèle RdP Partie mouture

### 4.6 Validation du modèle

Pour délimiter le cadre d'utilisation attendu d'un modèle il faut disposer de plusieurs ensembles de conditions expérimentales [SARGENT 79]. En effet, un modèle peut être considéré valide pour un ensemble de conditions expérimentales et invalide pour un autre. Pour être considéré valide pour un ensemble de conditions expérimentales donné, il faut que les résultats que le modèle génère soient dans une marge de précision acceptable considérée comme le degré de précision nécessaire pour atteindre les objectifs fixés. Dans la pratique, plusieurs modèles d'action sont obtenus de manière itérative afin d'obtenir un modèle valide.

La validation d'un modèle constitue un processus à part entière. Ce processus consiste à effectuer des tests d'évaluation permettant de présumer de la validité d'un modèle. Il est en effet impossible de montrer qu'un modèle de simulation est totalement valide sur l'étendue de son domaine d'application.

Il existe une grande variété de techniques de validation. Malheureusement, aucune procédure ou algorithme n'est disponible pour choisir la technique à utiliser suivant le type de modèle et le type d'application [SARGENT 84], [LEROUDIÉ 80]. Les techniques utilisées pour la validation de notre modèle, sont:

1. La validité de répétitivité (par comparaison avec d'autres modèles ou avec la réalité). Il est parfois possible de comparer les résultats de modèles de simulation sur des cas simples avec d'autres modèles valides (modèles analytiques ou modèles markoviens) ou avec la réalité (dans notre cas on se base sur l'historique).
2. Les tests de confrontation. Ils consistent à demander aux experts du système si le modèle et son comportement sont cohérents. On utilise cette technique pour déterminer de manière empirique si la logique de fonctionnement est correcte et si les relations entre les entrées du modèle et les résultats sont acceptables.
3. Les tests de conditions extrêmes et de dégénérescence. La structure et les résultats d'un modèle doivent être plausibles pour toute combinaison extrême ou non souhaitée des paramètres du modèle. La dégénérescence du comportement du modèle est testée en supprimant des portions du modèle.
4. L'utilisation de constantes. Des valeurs peuvent être fixées pour toutes les variables internes et les variables d'entrée d'un modèle afin de permettre une vérification des résultats du modèle par rapport à des calculs manuels.
5. Les traces. Les comportements de différentes entités du système sont tracés pendant une exécution pour déterminer si la logique du modèle est correcte et si la précision nécessaire est atteinte.
6. La validité prédictive. Le modèle est utilisé pour prédire le comportement du système. Des comparaisons sont faites pour déterminer si le comportement du système et les prédictions sont cohérentes.
7. Les graphiques et l'animation. Le fonctionnement opérationnel du système est affiché sous forme de courbes, histogrammes, camemberts donnant l'état de certaines entités du système (figure 4.10, figure 4.11, figure 4.12).
8. La validité structurelle. Un modèle d'action est structurellement valide non seulement s'il fournit des résultats satisfaisants mais également si la structure interne du modèle d'action correspond à la structure de fonctionnement de la réalité.

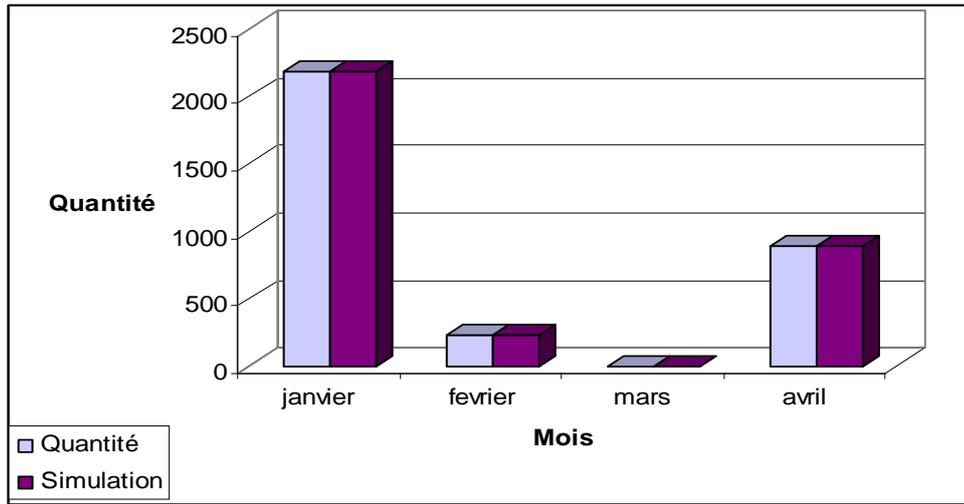


Figure.4.10. Comparaison entre la quantité réelle et la quantité donnée par simulation (Sirphyco) du nettoyage du blé avant mouillage.

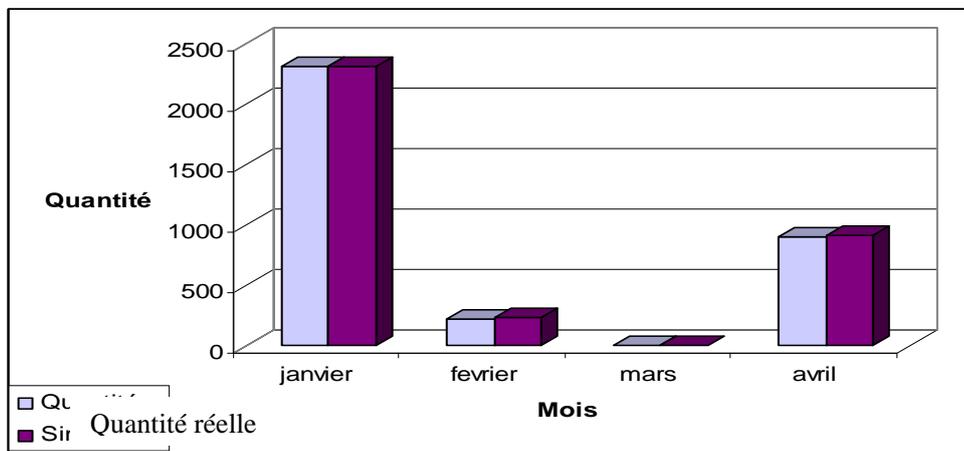


Figure.4.11. Comparaison entre la quantité réelle et la quantité donnée par simulation (Sirphyco) du nettoyage du blé après mouillage.

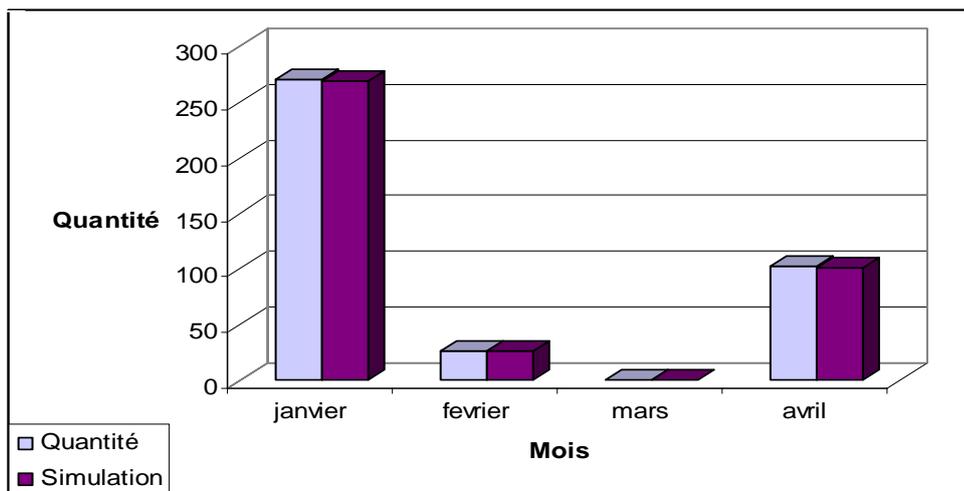


Figure.4.12. Comparaison entre la quantité réelle et la quantité donnée par simulation (Sirphyco) des déchets du nettoyage du blé.

Le réseau de petri nous à permis de décrire le processus de production d'un point de vue fonctionnelle et pour avoir une vision globale du système de production il faut prendre en considération l'aspect décisionnel (pilotage). Pour cela une étude du système de pilotage doit être réalisée.

#### 4.7 Modélisation du système de pilotage par les réseaux STP-CP

En vue de l'intégration du système de pilotage dans une approche de modélisation pour la simulation, nous avons utilisé les réseaux STP-CP pour le représenter, car les réseaux STP-CP prennent en considération le système physique et le système de décision.

##### 4.7.1 Formalisation du « réseau STP-CP »

Un « réseau STP-CP » (RSTP-CP) est un ensemble de trois classes d'objets :

- \_ Le système de traitement du produit – STP
- \_ Le centre de pilotage – CP
- \_ L'entité circulante – E

Il est défini formellement par un triplet :  $RSTP-CP = \langle STP, E, CP \rangle$  tel que :

- \_  $STP = \{STP1, STP2, STP3, \dots, STPn\}$  ensemble fini de processeurs STPs ;
- \_  $E = \{E1, E2, E3, \dots, Eq\}$  ensemble fini de types d'Entités ;
- \_  $CP = \{CP1, CP2, CP3, \dots, CPm\}$  ensemble fini de Centres de Pilotage ;

Définissons et analysons maintenant, ces trois classes d'objets.

##### 4.7.2 Formalisation du système de traitement du produit (STP)

###### 1- Définition du STP

Nous utilisons dans notre modèle, un processeur défini dans les travaux de Mohamed Bakalem et Georges Habchi [Bakalem 96] [Bakalem et al. 96], appelé : le STP (Système de Traitement du Produit). Nous formalisons le STP de la façon suivante (figure 4.13) :

$$STP = \langle Liste\_attributs, Liste\_fonctions, Liste\_indicateurs \rangle$$

Il peut être représenté par le schéma suivant :

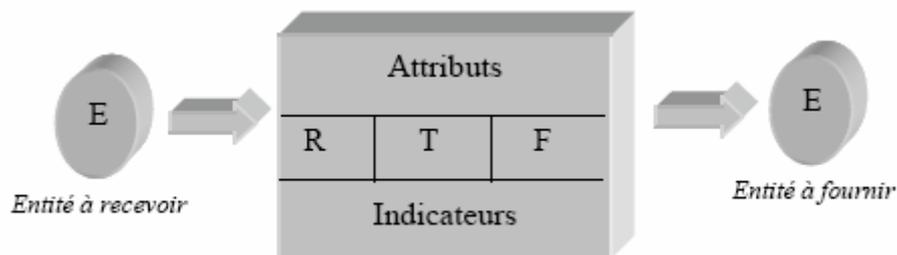


Figure. 4.13 Représentation schématique d'un STP (Système de Traitement du Produit) Détaillons chacun de ses éléments.

## 2- Liste des attributs du STP

La liste des attributs d'un STP concerne des informations propres. Les valeurs associées aux attributs correspondent aux données à renseigner par un utilisateur potentiel (en termes d'objet, il s'agit de son instanciation). Elles permettent d'identifier un STP et de renseigner les données réelles qui serviront au calcul des indicateurs.

## 3- Liste des fonctions du STP

Les fonctions correspondent principalement aux variables qui seront utilisées dans la logique de changement d'état d'un objet en vue de la modification de son état. Un STP possède quatre fonctions principales. Ainsi, la liste des fonctions est définie formellement par un quadruplet :

### 4- liste\_fonctions\_STP : <L ; R ; T ; F>

Tels que :

*L* : Charge du STP

*R* : fonction de réception du STP

*T* : fonction de transformation du STP

*F* : fonction de fourniture du STP

## 5- Liste des indicateurs du STP

Les indicateurs sont des fonctions qui dépendent des valeurs associées aux attributs et aux variables d'un STP à tout moment. La valeur d'un indicateur est mise à jour pendant l'évolution temporelle de l'état du STP en cours de simulation (indicateurs de processus) et en fin de simulation (indicateurs de résultats). Certains des indicateurs de performance affectés à un STP seront fondés sur les indicateurs de la démarche TPM. Les informations nécessaires à la formalisation de ces indicateurs en fonction de cette démarche sont explicitées selon le schéma suivant :

### 4.7.1.2 Formalisation de l'Entité Circulante (EC)

L'entité est l'objet représentant l'élément du flux physique. Elle peut être définie par un objet unitaire ou un assemblage d'objets unitaires ou composés (selon un processus récursif).

Nous définissons de manière formelle cette entité par le quadruplet suivant :

EC : <liste\_attributs ; liste\_fonctions ; liste\_indicateurs ; liste\_événements>

### 1- Liste des attributs de l'EC

La liste des attributs concerne des informations propres de l'Entité Circulante. Elles permettent d'identifier l'Entité et de renseigner les données réelles qui serviront au calcul des indicateurs qui lui sont associés. Ces attributs sont les suivants :

### 2- liste\_attributs\_EC : <I ; DL ; G>

Tels que :

*I* : Identificateur, attribut alphanumérique correspondant au type de l'entité

*DL* : Date de lancement en fabrication de l'entité, attribut réel

*G* : Gamme de l'entité

### 3- Liste des fonctions de l'EC

liste\_fonctions\_EC : <Créer ; Grouper ; Associer ; Dissocier ; Copier ; Supprimer>

La fonction *Créer* permet de générer des entités à lancer dans le système.

La fonction *Grouper* permet de réaliser un groupement définitif (assemblage) pour générer un produit fini à partir de composants ou d'autres groupements.

La fonction *Associer* permet de réaliser un groupement provisoire de pièces identiques pour générer un lot nécessaire au transport ou autre opération.

La fonction *Dissocier* permet d'éclater un groupement provisoire réalisé à l'aide de la fonction *Associer*.

La fonction *Copier* permet de réaliser des copies d'entités dans le système.

La fonction *Supprimer* permet de réaliser des suppressions d'entités dans le système (livraison aux clients par exemple en fin de production).

#### 4.7.2 Modélisation du système physique

##### Les entités E du système

La ligne de production de la minoterie fabrique **3 types d'Entités** (E1, E2, E3), représentant respectivement les trois types de produits suivants :

- Semoule I ———> E1 ;
- Semoule II ———> E2 ;
- Son ———> E3 ;

Il faut noter que les trois produits suivent la même gamme opératoire.

##### Les STP du système

#### Système de Transformation du Produit

La ligne de production est composée de deux sous système :

1. sous-système de nettoyage : ce système se compose de 15 ressources (STP) tableau 4.1.
2. sous-système de mouture : ce système est composé de 17 STP tableau 4.2.

Chaque STP est identifié selon les attributs suivants :

- I Identificateur
- Vr Vitesse de fonctionnement
- D Disponibilité

- Tma Temps moyen d'arrêt
- TO Temps d'ouverture

STP	I	Vr	D	Tma	TO	
SOUS-SYSTEME DE NETTOYAGE	STP1	Silos du stockage	-	-	-	
	STP2	Balance	25Kg/ 20s	1	-	7h30
	STP3	Séparateur	4.2T/H	0.98	1h30	7h30
	STP4	Épierreur	4T/H	0.98	1h	7h30
	STP5	Table densimétrie	3.8T/H	0.96	1h30	7h30
	STP6	Batterie (trieur)	4.2T/H	0.92	2h30	7h30
	STP7	Epointeuse a sec	4T/H	0.96	1h	7h30
	STP8	Vis mouilleuse 1	5T/H	1	-	7h30
	STP9	Cellule 1 <sup>er</sup> repos	-	-	-	-
	STP10	Vis mouilleuse 2	5T/H	1	-	7h30
	STP11	Cellule 2 <sup>eme</sup> repos	-	-	-	-
	STP12	Epointeuse humide	3.8T/H	0.9	2h	7h30
	STP13	Mouilleuse de correction	3.8T/H	1	-	7h30
	STP14	Boisseau intermédiaire	-	-	-	-
	STP15	Balance	25Kg/20s	1	-	7h30

Tableau 4.1. Information concernant les STP (sous-système de nettoyage)

STP	I	Vr	D	Tma	TO	
SOUS-SYSTEME DE NETTOYAGE	STP16	Cylindre B1	3.8T/H	0.95	2h	7h30
	STP17	Cylindre B2	3.8T/H	0.95	2h	7h30
	STP18	Cylindre B3	3.8T/H	0.95	2h	7h30
	STP19	Cylindre B4, B5	3.8T/H	0.95	2h	7h30
	STP20	Plansichter I	3.7T/H	0.92	2h30	7h30
	STP21	Plansichter II	3.7T/H	0.92	2h30	7h30
	STP22	Cylindre C1	4 T/H	0.95	2h	7h30
	STP23	Cylindre C2	4T/H	0.95	2h	7h30
	STP24	Cylindre C3	4T/H	0.95	2h	7h30
	STP25	Cylindre C4, C5	3.8T/H	0.95	2h	7h30
	STP26	Brosse	3.7T/H	0.98	1h	7h30
	STP27	Sasseur 1	3.7T/H	0.97	1h30	7h30
	STP28	Sasseur II	3.7T/H	0.96	1h30	7h30

Tableau 4.2. Information concernant les STP (sous-système de mouture)

### **4.7.3 Modélisation du système de pilotage**

Afin de pouvoir déterminer les opérateurs pilotant le système de production, on s'est basé sur l'organigramme de l'entreprise (figure 4.14) qui nous donne une vision détaillée des différents responsables dans l'entreprise ERIAD. Ainsi on a pu obtenir les informations suivantes :

La ligne de production de la minoterie est pilotée par quatre opérateurs (CP) qui sont :

1. Responsable du sous-système de nettoyage → CP1 ;
2. Responsable du sous-système de mouture → CP2 ;
3. Responsable du système de production et du CP1 et CP2 → CP12 ;
4. Responsable du contrôle qualité qui interagit seulement avec le responsable du système de production → CP3 ;

*Note : les sections Agréage, réception et expédition n'ont été pas prises en considération, car elles ne font pas partie du système de production.*

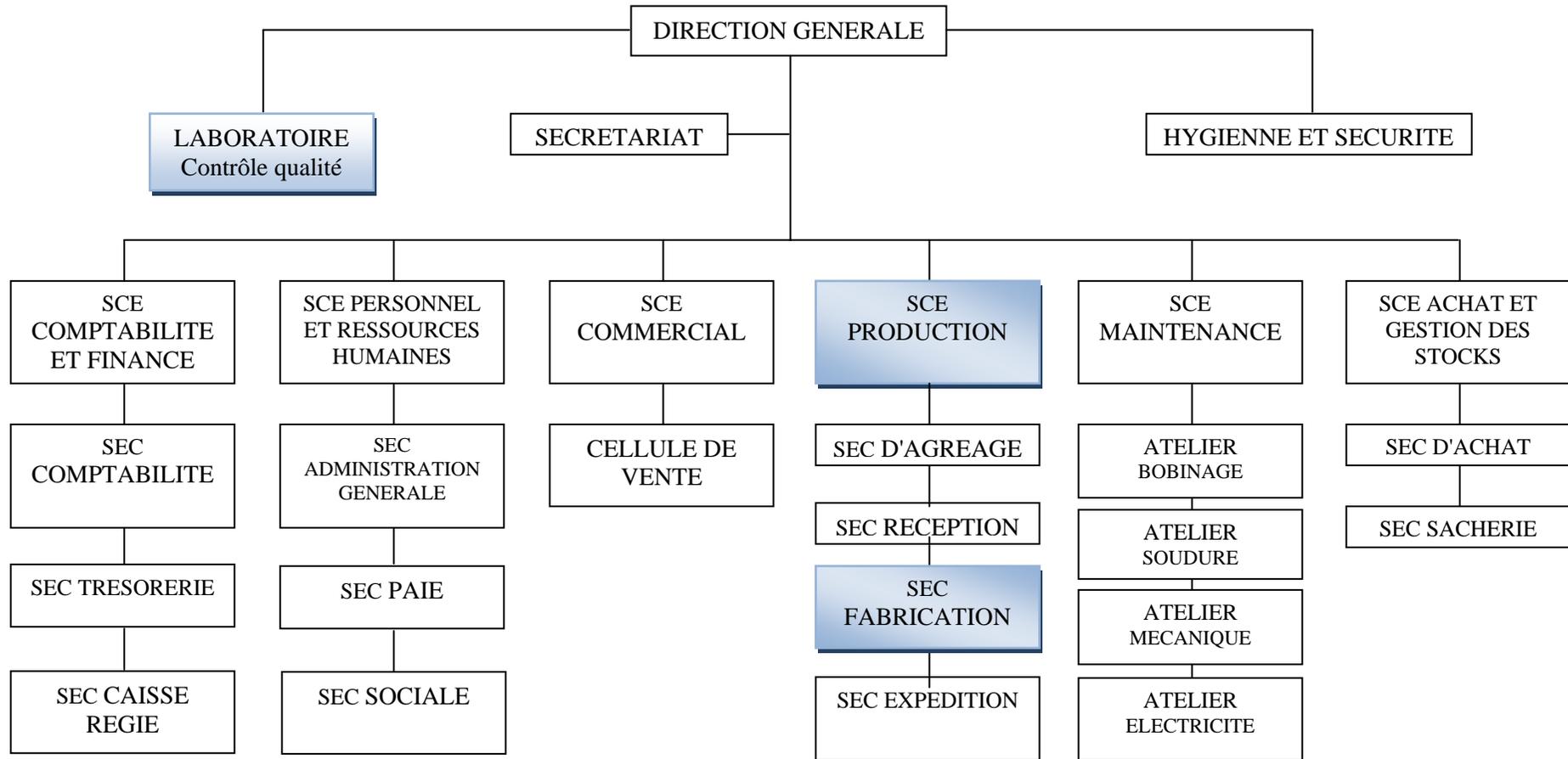


Figure.4.14. Organigramme globale de l'entreprise.

### 4.7.3.1 Description des centres de décision :

Nous nous focaliserons sur le premier niveau de CPs, constitué de CP1, CP2 et CP3., dont les données collectées sont présentées dans les tableaux 4.3, 4.4 et 4.5 :

Le centre de décision	CP1
* <i>Quel sont le (les) acteur(s) de votre flux étudié ?</i>	Trois opérateurs Pilote : STP1, ....., STP15 (sous-système de nettoyage)
* <i>Quel est le principal objectif de chacun des acteurs (que doivent-ils suivre en priorité) ?</i> - chiffrer cet objectif - quelle est son unité de mesure ?	- <b>nettoyer le blé</b> : assurer le nettoyage du blé avec une vitesse de 3.7 T/h. Doivent être exemptes d'odeurs et de goûts anormaux ainsi que d'insectes vivants. de souillures (impuretés d'origine animale y compris les insectes morts) en quantités susceptibles de présenter un risque pour la santé humaine. - <b>mouiller le blé</b> : assurer une teneur en eau entre 13% et 15% (selon le contrôle qualité)
* Vous avez donc un seuil limite à ne pas atteindre/dépasser	- On ne doit pas dépasser une teneur en eau > 15%
Peut-on s'alarmer avant ce seuil limite ?	-
* Comment suivez-vous cet objectif ? Par une mesure périodique ou systématique ? Dans ce cas, selon quelle périodicité (toutes les heures, toutes les 24 heures...)? Par une mesure événementielle ? Dans ce cas, quel est l'événement déclenchant ? (à chaque arrivée d'une pièce en stock...)	Le suivi des objectifs ce fait selon : 1. pour la quantité nettoyé : le suivi ce fait grâce aux balances situer au début et à la fin du processus de nettoyage et à la quantité de déchet cumulé à la fin du nettoyage 2. pour la teneur en eau : le service contrôle qualité établie un test d'humidité à chaque fois qu'un silo est rempli.
De quelle façon voulez-vous évaluer la performance de votre système ? donner une règle de calcul	L'évaluation de notre sous-système de nettoyage ce fait de la manière suivante : 1. déterminer la quantité de blé propre : quantité de blé sale – quantité de déchet cumulé = $Q_{bs} - Q_d = Q_p$ 2. Pour la vitesse de nettoyage : $\frac{\text{la quantité nettoyé}}{\text{temps de travail}} = \frac{Q_n}{T}$ 3. Pour la quantité d'eau utilisée : $\frac{Q_n - Q_p}{Q_n} * 100$
Evaluation du calcul de la performance : Si le résultat est ..., le seuil n'est pas atteint, on attend une prochaine mesure, on n'intervient pas sur le système Si le résultat est ..., il y a atteinte du seuil, il y a alarme, il faut déclencher le processus d'alerte	Il n'y a aucun seuil de sécurité
Quelles sont les principales causes pouvant expliquer que vos objectifs ne soit pas atteint ou maintenu ?	Les principales causes sont : • Pannes des équipements $\Rightarrow$ réduction de la capacité de production ; • Capacité des équipements $\Rightarrow$ réduction de la capacité de production ;

	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Taux d'humidité du blé élevé (&gt;15%) ⇒ qualité de la semoule inférieur et réduction de la capacité de production;</li> <li>• Contrôle qualité erroné ⇒ qualité de la semoule inférieur ;</li> <li>• Un temps de repos élevé ou réduit à la moyenne ;</li> </ul>
Est-ce qu'il y a des actions pour pouvoir rétablir la situation en cas de perturbation ?	<p>Les actions pouvant rétablir la situation</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Réduction des pannes ⇒ amélioration de la maintenance ;</li> <li>• Assurer un contrôle qualité plus efficace ;</li> <li>• Augmenter le temps d'ouverture pour les équipements à capacité inférieur ;</li> <li>• Ne pas ajouter plus de 4 à 5 % d'eau en une seule fois ;</li> <li>• Prolonger les temps de repos en hiver ;</li> </ul>

Tableau 4.3. Information concernant le CP1

Le centre de décision	CP2
* <i>Quel sont le (les) acteur(s) de votre flux étudié ?</i>	Trois opérateurs Pilote : STP16, ....., STP28 (sous-système de mouture)
* <i>Quel est le principal objectif de chacun des acteurs (que doivent-ils suivre en priorité) ?</i> - chiffrer cet objectif - quelle est son unité de mesure ?	<b>Transformer le blé en semoule en assurant deux opérations de base :</b> <ul style="list-style-type: none"> <li>• <b>Une opération de fragmentation-dissociation des grains ;</b></li> <li>• <b>Une opération de séparation des constituants</b></li> </ul> Optimiser les paramètres suivants : <ul style="list-style-type: none"> <li>• Assurer un taux d'extraction supérieur à 72% ;</li> <li>• Obtenir le maximum de semoule en réduisant en maximum le son (avoir le maximum d'extraction);</li> </ul>
* Vous avez donc un seuil limite à atteindre	- On ne doit avoir un tau d'extraction > 70%
<b>Peut-on s'alarmer avant ce seuil limite ?</b>	-
* Comment suivez-vous cet objectif ? Par une mesure périodique ou systématique ? Dans ce cas, selon quelle périodicité (toutes les heures, toutes les 24 heures...)? Par une mesure événementielle ? Dans ce cas, quel est l'événement déclenchant ? (à chaque arrivée d'une pièce en stock...)	Le suivi des objectif ce fait selon :  1 pour déterminer le taux d'extraction : le suivi ce fait grâce aux balances situer à la fin du processus de mouture et à la quantité de blé total nettoyer (après mouillage) à la fin du nettoyage 2 pour le suivi de la quantité des produit finis: le suivi ce fait grâce aux balances situer a la fin de chaque silo de stockage de produit fini (semoule I, semoule II, son).
De quelle façon voulez-vous évaluer la performance de votre système ? donner une règle de calcul	L'évaluation de notre sous-système de mouture ce fait de la manière suivante : 1. déterminer le taux d'extraction : quantité de blé nettoyer (après mouillage) / quantité de semoule obtenus = $\frac{\text{quantité total de semoule}}{\text{quantité total de blé nettoyer}} = \frac{Qs}{Qn}$  2. Pour la vitesse de nettoyage : $\frac{\text{la quantité produite}}{\text{temps de travail}} =$

	$\frac{Qs}{T}$
<p>Evaluation du calcul de la performance :</p> <p>Si le résultat est ..., le seuil n'est pas atteint, on attend une prochaine mesure, on n'intervient pas sur le système</p> <p>Si le résultat est ..., il y a atteinte du seuil, il y a alarme, il faut déclencher le processus d'alerte</p>	Il n'y a aucun seuil de sécurité
<p>Quelles sont les principales causes pouvant expliquer que vos objectifs ne soient pas atteints ou maintenus ?</p>	<p>Les principales causes sont :</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Pannes des équipements <math>\Rightarrow</math> réduction de la capacité de production ;</li> <li>• Capacité des équipements <math>\Rightarrow</math> réduction de la capacité de production ;</li> <li>• Taux d'humidité du blé élevé <math>&gt;15\%</math> <math>\Rightarrow</math> qualité de la semoule inférieure et réduction de la capacité de production ;</li> <li>• Blé mal nettoyé <math>\Rightarrow</math> qualité de la semoule inférieure taux d'extraction inférieure ;</li> <li>• Mauvais réglage des équipements pour les cylindres <math>\Rightarrow</math> réduction de la qualité et de la capacité de production ;</li> <li>• Coupure de courant ;</li> <li>• Blé mal humidifier ;</li> </ul>
<p>Est-ce qu'il y a des actions pour pouvoir rétablir la situation en cas de perturbation ?</p>	<p>Les actions pouvant rétablir la situation</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Réduction des pannes <math>\Rightarrow</math> amélioration de la maintenance ;</li> <li>• Assurer un contrôle qualité plus efficace ;</li> <li>• Augmenter le temps d'ouverture pour les équipements à capacité inférieure ;</li> <li>• Réglage systématique des équipements ;</li> <li>• Vérification quotidienne des tamiers</li> </ul>

Tableau 4.4. Information concernant le CP2

Le centre de décision	CP3
* <i>Quel sont le (les) acteur(s) de votre flux étudié ?</i>	cinq opérateurs
* <i>Quel est le principal objectif de chacun des acteurs (que doivent-ils suivre en priorité) ?</i> - chiffrer cet objectif - quelle est son unité de mesure ?	- <i>assurer le contrôle qualité du blé tout le long du processus de fabrication</i> - fournir les paramètres de fabrication pour les responsables de production (taux d'humidité, taux d'extraction, agréage)
* Vous avez donc un seuil limite à ne pas atteindre/dépasser	-
<b>Peut-on s'alarmer avant ce seuil limite ?</b>	-
* Comment suivez-vous cet objectif ? Par une mesure périodique ou systématique ? Dans ce cas, selon quelle périodicité (toutes les heures, toutes les 24 heures...) ? Par une mesure événementielle ? Dans ce cas, quel est l'événement déclenchant ? (à chaque arrivée d'une pièce en stock...)	en réalité il n'y a pas un suivi continu de nos objectifs, mais seulement une comparaison entre ce qui a été estimé par le service qualité et ce nous aurons obtenus en réalité pour les paramètres suivants : ➤ taux d'humidité ; ➤ taux d'extraction ; ➤ taux d'agréage ;
De quelle façon voulez-vous évaluer la performance de votre système ? donner une règle de calcul	L'évaluation consiste à prévoir les paramètres influant directement sur la production, ses paramètres sont : 1. Agréage des blés : pour le blé dur il faut qu'il soit $\geq 74\%$ ; 2. Taux de cendre : $\frac{\text{Poids résidu}}{\text{Poids blé}}$ ; 3. Taux d'humidité : $\frac{\text{Poids blé normal} - \text{Poids blé séché}}{\text{Poids blé normal}}$
Evaluation du calcul de la performance : Si le résultat est ..., le seuil n'est pas atteint, on attend une prochaine mesure, on n'intervient pas sur le système Si le résultat est ..., il y a atteinte du seuil, il y a alarme, il faut déclencher le processus d'alerte	Il n'y a aucun seuil de sécurité
Quelles sont les principales causes pouvant expliquer que vos objectifs ne soit pas atteint ou maintenu ?	Les principales causes sont : • Contrôle qualité erroné $\Rightarrow$ qualité de la semoule inférieur ; • Echantillonnage ne reflète pas tout le produit ;
Est-ce qu'il y a des actions pour pouvoir rétablir la situation en cas de perturbation ?	Les actions pouvant rétablir la situation • Augmenter le nombre de test $\Rightarrow$ afin de réduire l'erreur; • Augmenter la taille de l'échantillonnage ; • Assurer un suivi continu du processus de fabrication surtout dans les sections critique (section mouillage, section agréage, section repos, section mouture) ;

Tableau 4.5. Information concernant le CP3

la méthodologie nous a permis d'analyser le système à étudier et de collecter les données nécessaires pour constituer le modèle représentant le flux physique et son processus de pilotage (figure 4.15)

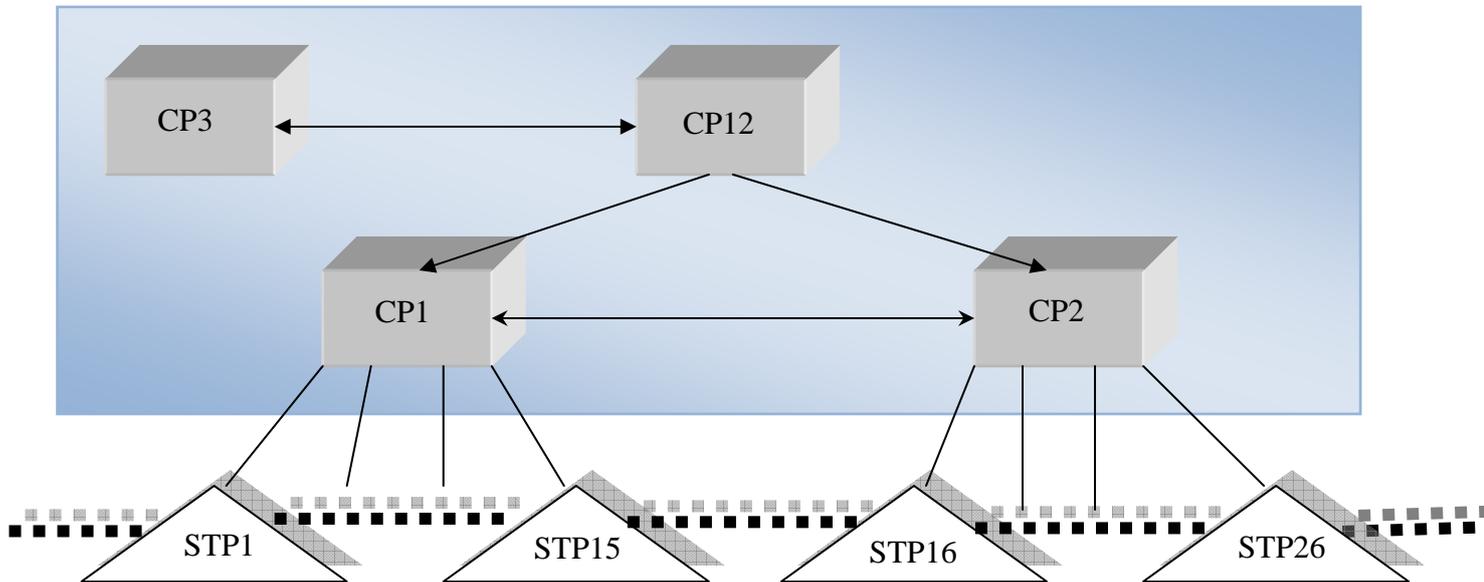


Figure.4.15. Réseau STP-CP du système de production

Selon l'analyse effectuée par les réseaux STP-CP, on constate que le CP3 (contrôle qualité) n'influe pas directement sur le système de production, c'est-à-dire, qu'il n'existe aucune décision de la part du CP3 qui réagit aussitôt sur le système de fabrication, le seul échange d'information consiste à faire des recommandations qui seront transmises vers les opérateurs CP1, CP2 via le responsable de la production (CP12) et qui veillera sur l'exécution de ses recommandations, mais cela peut engendrer une mauvaise interprétation des recommandations faite par le CP3, ce qui influera directement sur la qualité du produit et la cadence de production.

Pour remédier à ce problème, on a proposé d'associer au CP3 plus d'autorité, on lui consacrant des ressources (STPs) lui permettant d'assurer un contrôle qualité efficace.

Le choix des STPs n'a été pas par hasard, mais il fallait choisir des STPs offrant au CP3 l'opportunité de gérer le paramètre qualité dans le processus de fabrication de la minoterie de manière efficace (figure 4.15).

#### Les STPs affectés au CP3 sont :

- STP1 : permet le contrôle de l'agréage ;
- STP8 : Contrôlé la teneur en eau ;
- STP9 : contrôlé l'humidité ;
- STP10 : contrôlé et corrigé la teneur en eau ;
- STP11 : contrôle d'humidité ;

Le pilotage de ces STPs ce fait par l'affectation des opérateurs de contrôle de qualité à ses STPs, afin de permettre un suivi continu de qualité du processus de fabrication figure 4.16.

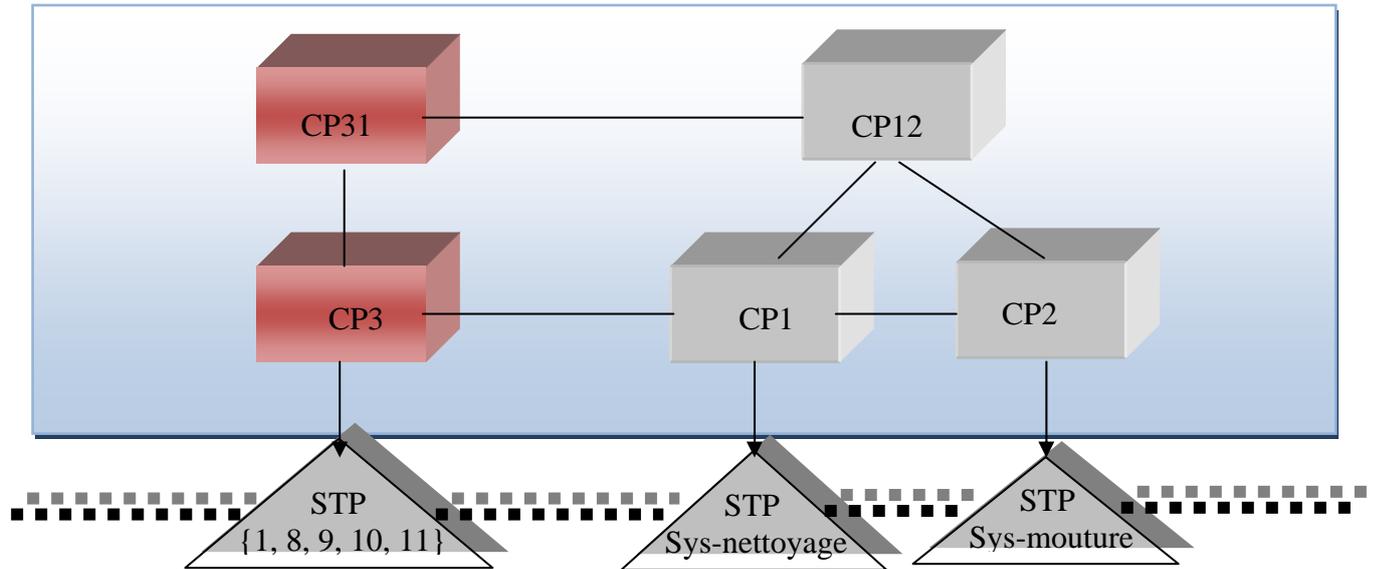


Figure.4.16. Réseau STP-CP du système de production amélioré

## 4.8. Le logiciel simul8

Le logiciel **SIMUL8** excelle dans la modélisation conceptuelle des systèmes (diagrammes de flux, *Reengineering*, etc), là où d'autres gros logiciels proposent une modélisation détaillée de la réalité.

La modélisation conceptuelle s'applique généralement aux phases d'étude précoces d'une installation afin d'en analyser les flux et d'en dimensionner les besoins en stockage et ressources diverses.

### 4.8.1. La philosophie de **SIMUL8** repose sur quelques principes de base

- La création d'un logiciel de simulation des plus simple et intuitif a été rendue possible par l'utilisation d'une interface explicite et de la méthode basique mais efficace du "glisser-posser", pour définir le process. L'utilisateur peut exécuter très rapidement des simulations animées sans écrire la moindre ligne de code.
- De nombreux accords avec d'autres éditeurs de logiciels complémentaires et répandus, permettent à leurs utilisateurs de tirer un bénéfice rapide de la simulation. Un diagramme *Visio* peut par exemple être converti en simulation **SIMUL8** en un clic de souris. Un lien avec les logiciels de simulation réaliste en 3D a également été développé pour les phases de simulation plus détaillées, utilisant une implantation du système et où les caractéristiques des moyens de manutention sont importantes.
- **SIMUL8** s'intègre en profondeur dans les technologies *Microsoft* (OLE, VBA).
- Basé sur une technologie de Template (objets préformatés), **SIMUL8** permet aux utilisateurs novices de créer des simulations puissantes répondant aux besoins de leur métier. Les clients experts dans leur domaine peuvent développer des assistants capables de construire une simulation

### 4.8.2. Les objets de base de **SIMUL8**

- Postes de travail, stocks et files d'attente
- Ressources partagées (opérateurs en mouvement...)
- Convoyeurs
- Réservoirs & Canalisations

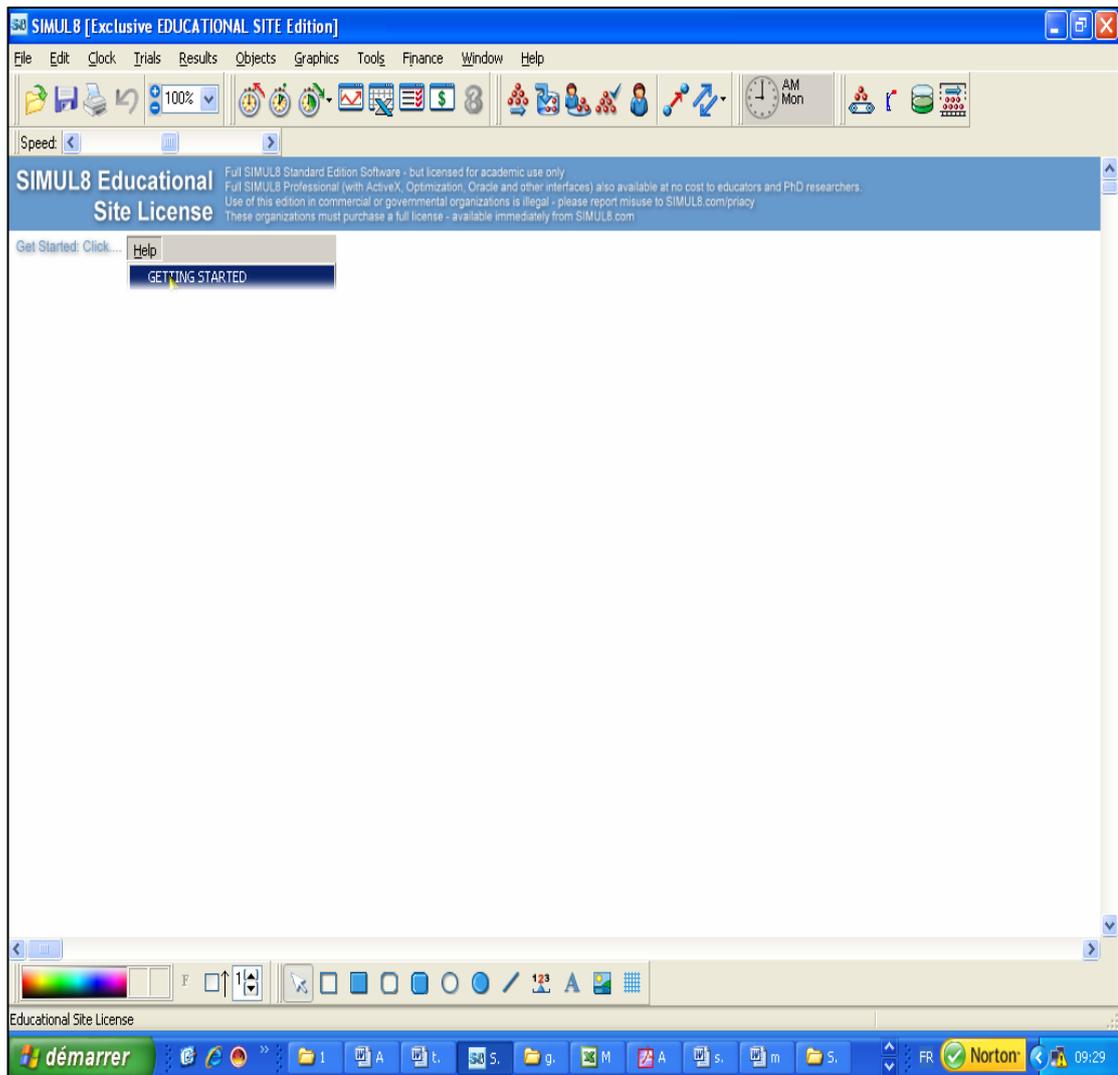
### *Des résultats et statistiques réalistes*

Les statistiques et résultats sont automatiquement produits par **SIMUL8** sous la forme de nombreux graphiques et rapports. Les résultats de simulation fournissent des informations sur tous les aspects de votre système, comme l'utilisation des équipements, le nombre d'articles produits... Les résultats peuvent être personnalisés et automatiquement intégrés dans des logiciels comme *MS-Excel*.

**SIMUL8** est un outil de calcul puissant intégrant une multitude de lois statistiques et de résultats prédéfinis adaptés aux besoins du dimensionnement.

### 4.8.3. L'interface SIMUL8 :

Au lancement de SIMUL8, une interface apparaîtra comme suite (figure 4.17)



**Figure.4.17.** Interface SIMUL8

L'interface SIMUL8 offre les composants nécessaires à la réalisation du modèle de simulation les plus important sont :

**1- Objets :** Un modèle SIMUL8 se compose des " objets " (files d'attente, centres de travail) sur l'écran avec une structure de défaut (cheminement) entre eux et les " articles de travail " qui coulent autour du modèle - ces " articles de travail " sont les " travaux " qui sont faits dans votre organisation.

**2- Graphics** : SIMUL8 vous laisse établir un modèle qui est fortement adapté à vos besoins selon la situation proposé. Cependant, vous pouvez facilement créer nos propres images pour remplacer ou augmenter ceux fournis en tant que norme.

**3- Visual Logic** : La logique visuelle (VL) est un environnement de programmation de logique de fonctionnement dans SIMUL8. Dans un modèle de complexité significative vous pouvez ajouter vos propres règles pour orienter le travail. VL vous permet d'ajouter la logique de fonctionnement de manière très détaillée. Il est naturellement structuré donc à un certain nombre de niveaux pour vous permettre d'accéder rapidement à la logique utilisée dans une partie particulière du modèle et de voir, également, facilement la logique des règles que vous avez écrites.

#### **4.8.4. Les objets utilisés dans SIMUL8 :**

Un **OBJET** dans **SIMUL8** représente une « grandeur » dans le modèle de simulation.

Les **objets** de la simulation SIMUL8 sont:

- Centre de travail ;
- Convoyeur ;
- Centre de stockage ;
- Ressources ;
- Points De Sortie De Travail;
- Points D'entrée De Travail

#### **Points D'entrée De Travail**

Un point d'entrée de travail est un objet du générateur de travail. C'est l'endroit où apparaît le premier travail dans votre simulation. Vous pouvez avoir autant de points d'entrée de travail que vous voulez. Chacun peut alimenter le travail en employant différentes distributions statistiques selon les types d'article de travail qui existent.

**Remarque** : le changement des paramètres des objets utilisés dans SIMUL8 se fait par double clic sur l'icône les identifiants, une boîte de dialogue s'affiche (figure 4.18).

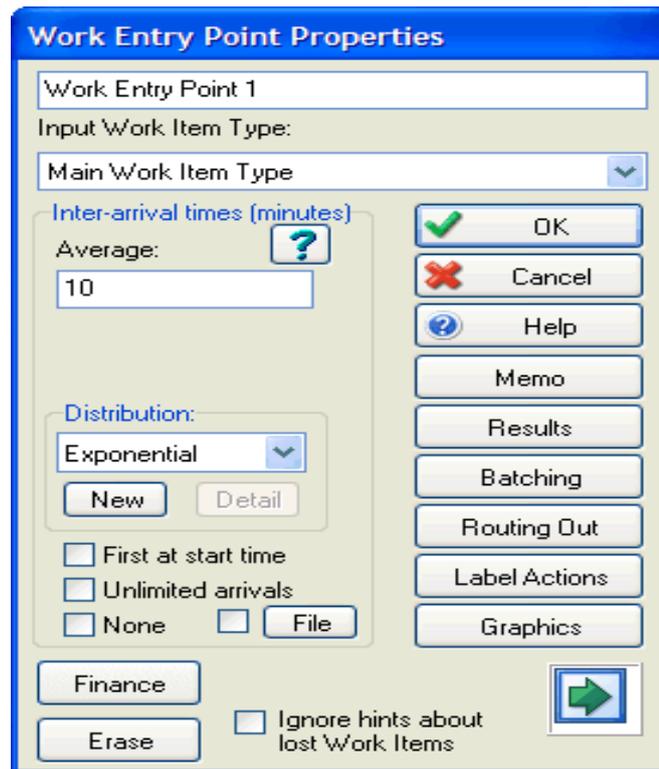


Figure.4.18. Boite de dialogue (Point d'entrée de travail)

Cette boîte de dialogue contient des paramètres permettant le contrôle du mode de fonctionnement de notre *Point d'entrée de travail*.

### Centre de travail :

Un centre de travail est un endroit où le travail a lieu sur des articles de travail (figure 4.19). Après que le travail soit effectué l'article de travail peut être envoyé à un autre centre de travail, ou à un certain nombre de centre de travail différent selon les règles de cheminement qui peuvent être indiquées.

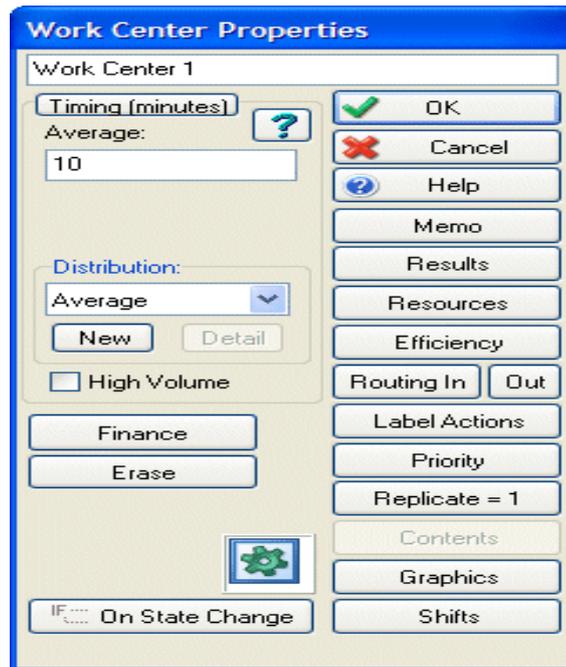


Figure.4.19. Boite de dialogue (Centre de travail)

### Convoyeur :

Le nombre d'articles de travail qui peuvent être sur un convoyeur est déterminé par la longueur du convoyeur et la taille de l'article de travail. La vitesse d'un convoyeur, combinée avec sa longueur affecte la vitesse du convoyeur.

Les convoyeurs peuvent être employés de différentes manières, mais ils y a une similitude avec les centres de stockage (figure 4.20).

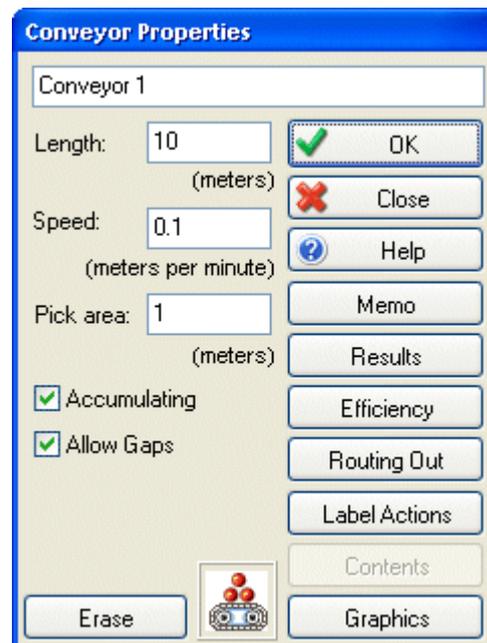


Figure.4.20. Boite de dialogue (Convoyeur)

**Centre de stockage :** 

Un centre de stockage est l'un des objets fondamentaux qui composent la structure d'un modèle de simulation. Pour les centres de stockage, on peut leur assigner beaucoup de paramètres tel que le temps d'attente, capacité de stockage, durée d'utilisation, temps moyen de stockage,...etc. Tous ses paramètres peuvent être modifiés grâce à la boîte de dialogue (figure 4.21).



Figure.4.21. Boîte de dialogue (Centre de stockage)

**Ressources :**

Les « ressources » sont des articles dans le modèle de simulation. Les centres de travail ne peuvent commencer le travail qu'en présence d'un article de travail. Les ressources sont partagées entre tous les centres de travail qui les ont employés. Elles sont utilisées en tant que ressources « partagées » ou « flottantes ». Les exemples des « ressources » sont :

- Outils de travail pour les machines ;
- Lits dans un hôpital ;
- Energie ;



Figure.4.22. Boite de dialogue (Ressource)

**Points De Sortie De Travail :** 

Un point de sortie de travail est l'endroit où le travail de votre simulation est complet ou «finies ».

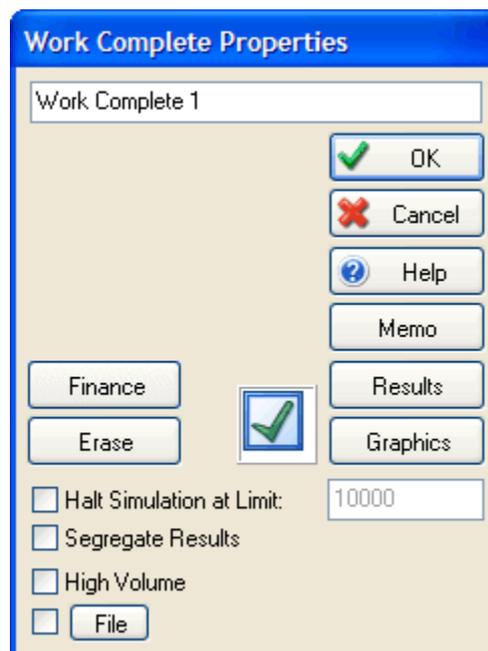


Figure.4.23. Boite de dialogue

**4.9. Modèle de simulation du système de production :**

Pour notre étude de cas, et à fin de réaliser le modèle de simulation, on a introduit le modèle RdP (figure 4.24, figure 4.25) élaboré dans le simulateur en remplaçant chaque place par un objet de simulation, Pour notre système de production on a utilisé trois types d'objets :

1. l'objet Centre de travail ;

2. l'objet Centre de stockage ;
3. l'objet Convoyeur ;

Chacun de ses objets représente une entité physique sur notre système réel et afin d'être plus proche de la réalité il fallait associer à chacun de ses objets des paramètres décrivant le fonctionnement réel de ces entités. Ces paramètres diffèrent selon le type d'objet et la nature de l'entité à simuler. Le paragraphe suivant donne un aperçu de ses paramètres.

1- paramètre associé au Centre de travail : l'objet Centre de travail est un module qui permet de simuler le comportement des équipements (machines), pour cela il peut comprendre un nombre important de paramètre, les paramètres utilisés dans notre cas et qui offre une description détaillé des équipements de notre système sont :

- Vitesse de fonctionnement (**Vr**): paramètre obtenu suivant la fiche technique de l'équipement, elle diffèrent selon la nature de l'équipement ;
- Disponibilité (**D**) : paramètre calculé sur la base de l'historique d'arrêt de chaque équipement  

$$= 1 - \frac{\sum \text{Temps d'arrêt}}{\text{Temps Total de travail}} ;$$
- Temps moyen d'arrêt (**Tma**) : paramètre calculé sur la base de l'historique d'arrêt de chaque équipement  

$$= \frac{\sum \text{Temps d'arrêt}}{\text{Nombre d'arrêt}} ;$$
- Temps moyen de réparation (**Tmr**) : paramètre obtenu par le service maintenance de l'entreprise ;
- Coût d'utilisation (**Cu**) : il représente le coût engendré par l'utilisation de l'équipement (main d'œuvre, énergie) ;
- Coût d'arrêt (**Ca**) : les pertes dut à un arrêt, valorisé selon la notion de coût Les coûts d'arrêt peuvent être calculé selon la relation suivante :  $Ca = \text{Charge fixe/minute} + \text{perte en profit de production/minute}$  ;
- Logique de fonctionnement (**Lf**) : la logique de fonctionnement décrit les règles (logique, booléen, ...) approprier de fonctionnement de chaque équipement, elles sont introduite dans le centre de travail grâce au module *VISUAL LOGIC* ;

#### **Détermination du coût d'arrêt :**

Le coût d'arrêt regroupe les charges fixes représenté par les salaires des employeurs et l'estimation de la perte en production pendant les arrêts.

✓ Calcul du coût fixe par minute :

Mois	Somme des salaires des ouvriers (DA)	Nombre de jours	Nombre d'heures
Janvier	195.958,72	20	160

$$C_f = \frac{195.958,72}{160 * 60} = 20.5 \text{ DA/Minute.}$$

✓ Calcul du coût de perte en production par minute :

$$C_{pp} = \frac{3,7 * 286,5}{60} = 17.66 \text{ DA}$$

Ou :

3,7 —————> Capacité de production par heure,

286.5 —————> marge bénéficière par quanto

De cela, on peut déduire le coût d'arrêt par minute  $C_a = 20.5 + 17.66 = 38.16 \text{ DA}$

#### Détermination du coût d'utilisation :

Le coût d'utilisation regroupe le coût de la main d'œuvre et le coût de l'électricité

Mois	Consommation d'électricité (DA)	Nombre de jours	Nombre d'heures
Janvier	349625,03	20	160

$$C_u = 20.5 + \frac{349625,03}{160 * 60} = 20.5 + 36.41 = 56.61 \text{ DA/minute.}$$

La valeur des paramètres des différents équipements est présentée dans le tableau 4.6.

2- paramètre associer au Centre de stockage : le module centre de stockage permet, dans notre système réel, de représenter les silos de stockage du blé, ses silos sont identifiés par leur capacité de stockage et le temps de séjour (pour les silos de repos). Les paramètres de description des silos sont :

- Capacité de stockage (Sto) = 21 T;
- Temps moyen de séjour dans les silos de repos (TmR) = 8h;

3- paramètre associer au convoyeur : le module convoyeur simule le système de transport du blé au sein de l'entreprise, qu'il soit pneumatique ou hydraulique, il est caractérisé par le paramètre « vitesse » estimé à 4.8T/h.

En plus des paramètres associés à chaque objet dans notre modèle de simulation, il fallait ajouter d'autre paramètres d'écrivant le fonctionnement du système de manière générale, ses paramètres sont :

- Temps d'ouverture estimé à 8H par jour ;
- Coût de revient (Cr) fourni par le service comptable, sa valeur est de 286.5 DA ;
- Marge de bénéfice Mb= 286.5 DA;
- Planning de production ;
- Prévision des ventes ;

Tous ces paramètres sont introduits dans le modèle de simulation afin d'élaborer un modèle décrivant *rigoureusement* le fonctionnement du système réel.

Après avoir introduit tous les paramètres dans les différents modules, le modèle obtenu est représenté sur les figures 4.24 (Sous-système de nettoyage) et 4.25 (Sous-système de mouture)

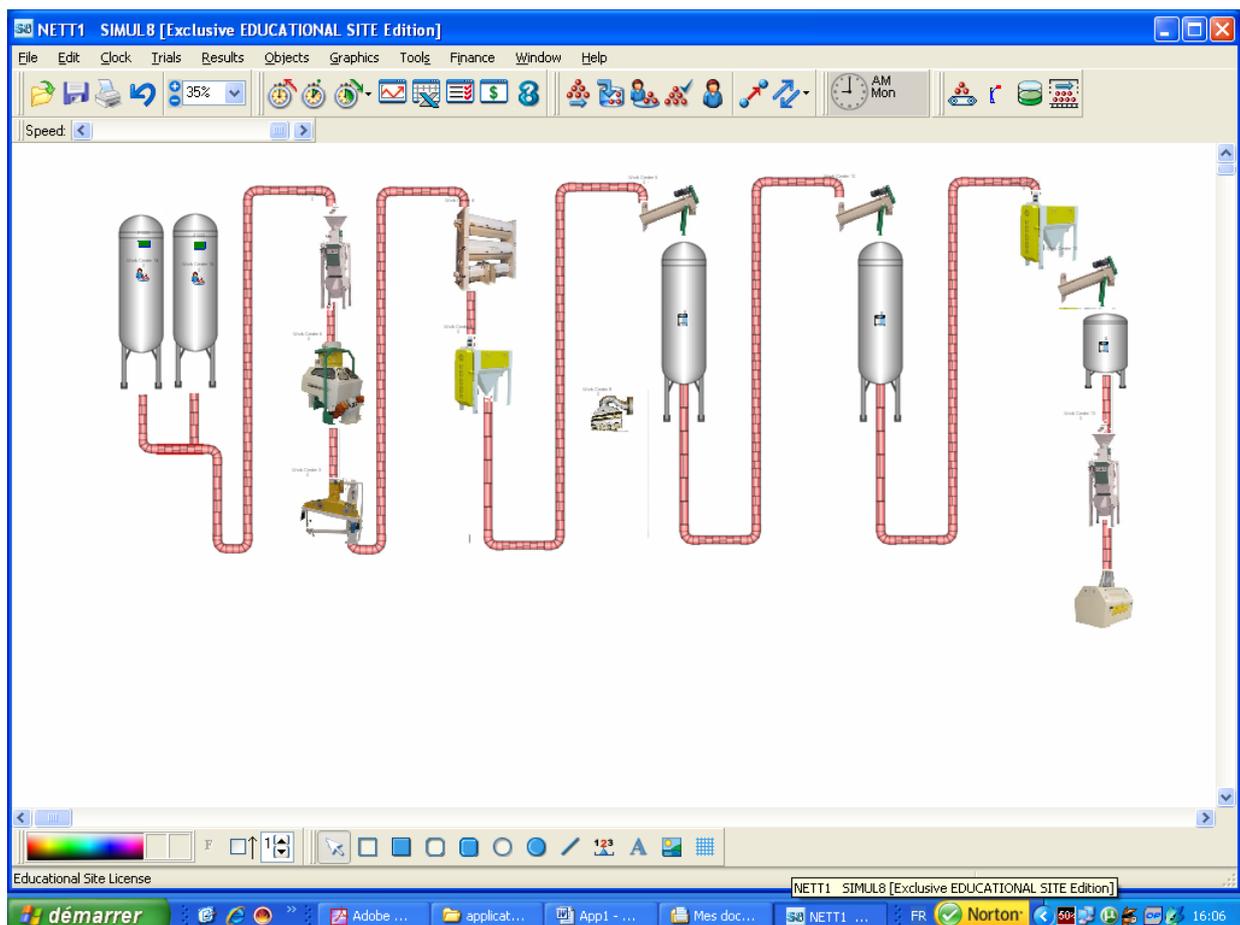


Figure.4.24. Modèle de simulation partie Nettoyage

	<b>Equipement</b>	<b>Vr</b>	<b>D</b>	<b>Tma</b>	<b>TO</b>	<b>Tmr</b>	<b>Ca</b>
<b>SOUS-SYSTEME DE NETTOYAGE</b>	Silos du stockage	-	-	-	-		38.16 DA
	Balance	25Kg/ 20s	1	-	7h30		38.16 DA
	Séparateur	4.2T/H	0.98	1h30	7h30	45m	38.16 DA
	Epierreure	4T/H	0.98	1h	7h30	30m	38.16 DA
	Table densimétrie	3.8T/H	0.96	1h30	7h30	60m	38.16 DA
	Batterie (trieur)	4.2T/H	0.92	2h30	7h30	1h30	38.16 DA
	Epointeuse a sec	4T/H	0.96	1h	7h30	30m	38.16 DA
	Vis mouilleuse 1	5T/H	1	-	7h30		38.16 DA
	Cellule 1 <sup>er</sup> repos	-	-	-	-		38.16 DA
	Vis mouilleuse 2	5T/H	1	-	7h30		38.16 DA
	Cellule 2 <sup>eme</sup> repos	-	-	-	-		38.16 DA
	Epointeuse humide	3.8T/H	0.9	2h	7h30	1h30	38.16 DA
	Mouilleuse de correction	3.8T/H	1	-	7h30		38.16 DA
	Boisseau intermédiaire	-	-	-	-		38.16 DA
	Balance	25Kg/20s	1	-	7h30		38.16 DA
<b>SOUS-SYSTEME DE MOUTURE</b>	Cylindre B1	3.8T/H	0.95	2h	7h30	1h	38.16 DA
	Cylindre B2	3.8T/H	0.95	2h	7h30	1h	38.16 DA
	Cylindre B3	3.8T/H	0.95	2h	7h30	1h	38.16 DA
	Cylindre B4, B5	3.8T/H	0.95	2h	7h30	1h	38.16 DA
	Plansichter I	3.7T/H	0.92	2h30	7h30	1h30	38.16 DA
	Plansichter II	3.7T/H	0.92	2h30	7h30	1h30	38.16 DA
	Cylindre C1	4 T/H	0.95	2h	7h30	1h	38.16 DA
	Cylindre C2	4T/H	0.95	2h	7h30	1h30	38.16 DA
	Cylindre C3	4T/H	0.95	2h	7h30	1h30	38.16 DA
	Cylindre C4, C5	3.8T/H	0.95	2h	7h30	1h	38.16 DA
	Brosse	3.7T/H	0.98	1h	7h30	30m	38.16 DA
	Sasseur 1	3.7T/H	0.97	1h30	7h30	1h	38.16 DA
	Sasseur II	3.7T/H	0.96	1h30	7h30	1h	38.16 DA

**Tableau 4.6.** Les différents paramètres utilisés pour chaque équipement du processus de production.

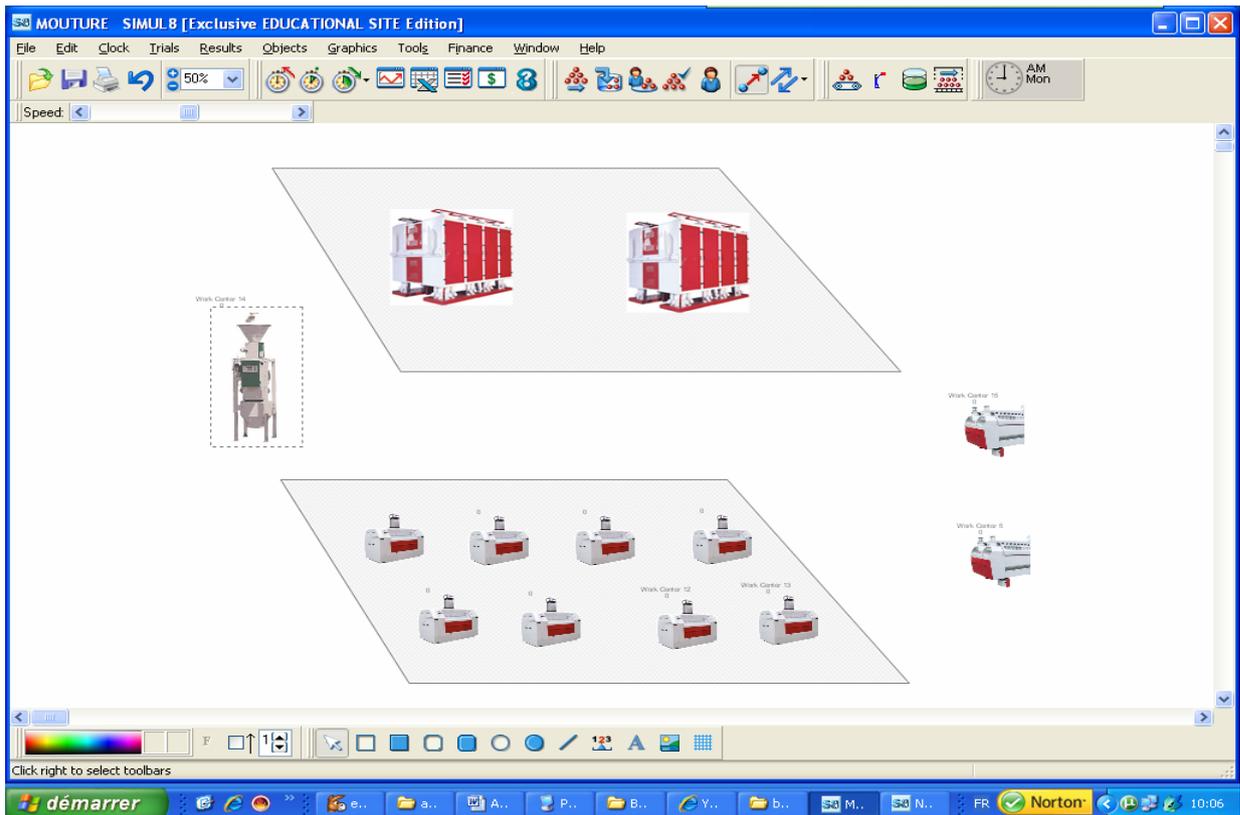


Figure.4.25. Modèle de simulation partie Mouture

Pour mieux gérer un système de production il faut avoir une idée précise sur son potentiel, pour aboutir à cela, une analyse de la productivité du système à été réalisée pour déterminer avec précision le potentiel de notre système étudié. Le mécanisme d'analyse utilisé est le **TRS (Taux de rendement synthétique)**, ce dernier nous offre une vue détaillée, pas compliquée, du notre système et de son état.

Dans la démarche **TPM**, le **TRS** est l'indicateur de base auquel on peut joindre d'autres indicateurs.

#### 4.10 Rôle du TRS

**Le TRS mesure le rapport du temps utile au temps d'ouverture.** Ce temps d'ouverture peut être interprété de manière très différente, et cela suivant la décomposition des temps. Il y a deux « écoles » sur cette décomposition des temps, celle de l'Afnor et celle du CNOMO. La décomposition des temps n'étant pas normalisée, chaque entreprise utilise ces référentiels comme bon lui semble, ainsi nous devons être prudents lorsqu'on compare deux TRS entre eux. Pour notre cas, la décomposition des temps pour l'entreprise cible est représentée sur la figure 4.26.

<b>Temps d'ouverture de l'équipement ou Temps requis (TO)</b>				
<b>Temps des arrêts identifiés</b>		<b>Temps brut de fonctionnement (TBF)</b>		
<b>Pannes</b>	<b>Changements de série</b>	<b>Durée des ralentissements</b>		<b>Temps net de fonctionnement (TNF)</b>
		<b>Micro-arrêts</b>	<b>Régime anormal</b>	
		<b>Temps de productions défectueuses</b>		<b>Temps utile ou temps de marche efficace (TU)</b>
		<b>En régime croisière</b>	<b>En régime transitoire</b>	

Figure 4.26. Décomposition du temps selon l'entreprise

Le TRS peut être calculé de plusieurs façon, soit à l'aide d'un enchaînement de ratios, soit plus simplement en considérant qu'il est égal à la production effective divisée par le nombre total de pièces qui *auraient dû* être produites pendant le temps d'ouverture sur la base de la cadence théorique (N)

$$\text{TRS} = \frac{P - \text{Def}}{N}$$

Ce premier mode de calcul ne permet pas de mettre en évidence les différentes causes d'inefficacité, c'est pourquoi il est préférable de décomposer le TRS en facteurs simples, ses facteurs sont :

- o le *taux brut de fonctionnement* de la machine, qui traduit l'influence des arrêts identifiés sur :

$$\text{TBF} = \frac{\text{Temps d'ouverture} - \text{Temps des arrêts}}{\text{Temps d'ouverture}} = \frac{\text{TBF}}{\text{TO}}$$

- le *taux net de fonctionnement* de la machine

$$TNF = \frac{\text{Pr oduction réalisée} \times \text{Temps de cycle réel}}{\text{Temps d'ouverture} - \text{Temps des arrêts}} = \frac{P \times TCR}{TBF}$$

○ Le temps de cycle réel correspond simplement à la durée réelle de fabrication l'une entité, alors que le temps de cycle théorique se base sur la durée supposée de fabrication d'une entité. La dégradation de la cadence de la machine par rapport à son régime de croisière (dit régime nominal) est mesurée par le ratio R. Il faut être attentif au fait que plus le rendement de la machine se dégrade, plus le temps de cycle réel augmente par rapport à sa valeur théorique ; le ratio R diminue alors. Dans les entreprises, il est rare que la cadence réelle soit égale à la cadence nominale.

$$R = \frac{\text{Temps de cycle théorique}}{\text{Temps de cycle réel}} = \frac{TCT}{TCR}$$

○ Le produit du taux net de fonctionnement et du ratio R fournit un indicateur appelé **taux de performance** ; il fait apparaître l'influence des ralentissements et des micros arrêts, c'est-à-dire l'influence d'une cadence globalement inférieure à la cadence supposée.

$$T_p = \frac{P \times TCR}{TBF} \times \frac{TCT}{TCR} = \frac{P \times TCT}{TBF}$$

- **Taux de qualité** traduit l'influence de la non-qualité sur la production totale

$$T_q = \frac{\text{Pr oduction réalisée} - \text{Pr oduits défectueux}}{\text{Pr oduction réalisée}} = \frac{P - Def}{P}$$

Finalement, on obtient le TRS :

$$TRS = TBF * T_p * T_q$$

Afin de pouvoir déterminer la valeur du TRS pour notre système, une simulation de notre système de production en régime nominale nous a permis d'estimer les différents facteurs du TRS. L'estimation consiste à cueillir des informations sur le fonctionnement de notre système pour chaque entité et de les réutiliser afin de déterminer la valeur des différents facteurs de l'indicateur TRS.

Les informations récoltées par simulation pour chaque entité dans notre modèle sont :

- Temps net de travail (Tnt);

- Temps d'attente ( $T_w$ ) ;
- Temps d'arrêt ( $T_a$ ) ;
- Temps de cycle réel ( $T_{cr}$ ) ;
- Coût d'arrêt ( $C_a$ ) ;

Les résultats obtenus par simulation d'une journée de travail sont regroupés dans le tableau 4.7

Equipement		Tnf (H)	Tw (H)	Ta (H)	Tcr (T/H)	Ca DA
SOUS-SYSTEME DE NETTOYAGE	Silos du stockage		-	-	-	-
	Balance		-	-	-	-
	Séparateur	0,3696	0,104	7,4464	2,602331	846,2362
	Epiereure	0,28	0,1376	7,5824	2,555655	641,088
	Table densimétrie	0,224	0,0576	7,7984	2,484869	512,8704
	Batterie (trieur)	0,152	0,0784	7,7696	2,494079	348,0192
	Epointeuse a sec	0,2	0,0576	7,8224	2,477245	457,92
	Vis mouilleuse 1	-	-	-	-	-
	Cellule 1 <sup>er</sup> repos	-	-	-	-	-
	Vis mouilleuse 2	-	-	-	-	-
	Cellule 2 <sup>eme</sup> repos	-	-	-	-	-
	Epointeuse humide	-	-	-	-	-
	Mouilleuse de correction	-	-	-	-	-
	Boisseau intermédiaire	-	-	-	-	-
Balance	-	-	-	-	-	
OUS-SYSTEME DE MOUTURE	Cylindre B1	0,2656	0,1336	7,6008	2,549468	608,1178
	Cylindre B2	0,2656	0,1336	7,6008	2,549468	608,1178
	Cylindre B3	0,2656	0,1336	7,6008	2,549468	608,1178
	Cylindre B4, B5	0,2656	0,1336	7,6008	2,549468	608,1178
	Plansichter I	0,3456	0,0576	7,5968	2,550811	791,2858
	Plansichter II	0,3456	0,0576	7,6768	2,524229	791,2858
	Cylindre C1	0,132	0,0736	7,7944	2,486144	302,2272
	Cylindre C2	0,132	0,0736	7,7944	2,486144	302,2272
	Cylindre C3	0,132	0,0736	7,7944	2,486144	302,2272
	Cylindre C4, C5	0,132	0,0736	7,7944	2,486144	302,2272
	Brosse	0,0496	0,0256	7,9248	2,445235	113,5642
	Sasseur I	0,052	0,0104	7,8432	2,470675	119,0592
	Sasseur II	0,052	0,0104	7,8432	2,470675	119,0592

Tableau 4.7. Les résultats obtenus par simulation pour chaque équipement

Grâce aux résultats obtenus par simulation, les valeurs des différents facteurs du TRS sont présentées dans le tableau 4.8.

	<b>Equipement</b>	<b>T<sub>hf</sub></b>	<b>T<sub>nf</sub></b>	<b>R</b>	<b>T<sub>p</sub></b>	<b>TRS</b>
<b>SOUS-SYSTEME DE NETTOYAGE</b>	Silos du stockage	-	-	-	-	-
	Balance	-	-	-	-	-
	Séparateur	0,9538	0,975886	0,703333	0,686373	0,654662
	Epierreure	0,965	0,982176	0,690718	0,678406	0,654662
	Table densimétrie	0,972	1,002881	0,671586	0,673521	0,654662
	Batterie (trieur)	0,981	0,99001	0,674076	0,667342	0,654662
	Epointeuse a sec	0,975	1,002872	0,669526	0,671448	0,654662
	Vis mouilleuse 1	-	-	-	-	-
	Cellule 1 <sup>er</sup> repos	-	-	-	-	-
	Vis mouilleuse 2	-	-	-	-	-
	Cellule 2 <sup>eme</sup> repos	-	-	-	-	-
	Epointeuse humide	-	-	-	-	-
	Mouilleuse de correction	-	-	-	-	-
	Boisseau intermédiaire	-	-	-	-	-
<b>SOUS-SYSTEME DE MOUTURE</b>	Cylindre B1	0,9668	0,982727	0,689046	0,677143	0,654662
	Cylindre B2	0,9668	0,982727	0,689046	0,677143	0,654662
	Cylindre B3	0,9668	0,982727	0,689046	0,677143	0,654662
	Cylindre B4, B5	0,9668	0,982727	0,689046	0,677143	0,654662
	Plansichter I	0,9568	0,992475	0,689408	0,68422	0,654662
	Plansichter II	0,9568	1,002926	0,682224	0,68422	0,654662
	Cylindre C1	0,9835	0,990646	0,671931	0,665645	0,654662
	Cylindre C2	0,9835	0,990646	0,671931	0,665645	0,654662
	Cylindre C3	0,9835	0,990646	0,671931	0,665645	0,654662
	Cylindre C4, C5	0,9835	0,990646	0,671931	0,665645	0,654662
	Brosse	0,9938	0,99678	0,660874	0,658746	0,654662
	Sasseur 1	0,9935	0,986814	0,66775	0,658945	0,654662
	Sasseur II	0,9935	0,986814	0,66775	0,658945	0,654662

**Tableau 4.8.** Les valeurs des différents facteurs du TRS

Selon les résultats exposés dans le tableau 4.4, on peut dire, que la valeur du taux de rendement synthétique, qui est égale à 0.66%, est acceptable pour le système de production, car elle reflète un état de fonctionnement admissible puisque le système de production est assez nouveaux (date de mise en service 1999), mais le ratio TRS ne reflète pas l'état de la gestion de production

dans l'entreprise, pour cela il faut réaliser une analyse nous permettant de déterminer le niveau de gestion de production en terme d'efficacité. Pour faire simple et compte tenu du fait que dans cette démarche nous suivons la performance d'un système de production et non celle des individus, on a eu recours a simuler le planning de production pendant les quatre premiers mois de l'année 2006 (tableau 4.9) et les comparer avec les donnée réel afin d'aboutir un diagnostic de la situation de la gestion de production dans l'entreprise.

Mois	Quantité lancée (quintal)	Nombre de jours de travail
Janvier	2449.80	15
Février	250.00	3
Mars	0	0
Avril	993.00	9

Tableau 4.9. Planning de production réalisé pendant le premier trimestre

Cette comparaison nous a permis d'établir les histogrammes suivants (Fig 4.27, 4.28, 4.29) :

- Mois de JANVIER / 2006 :

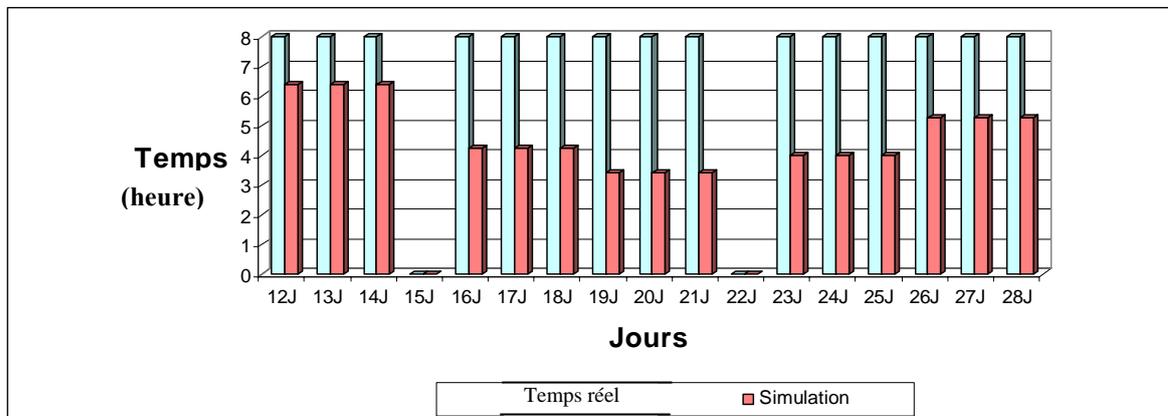


Figure.4.27. Comparaison entre le temps réel de nettoyage et le temps simulé.

• Mois de FEVRIER/ 2006 :

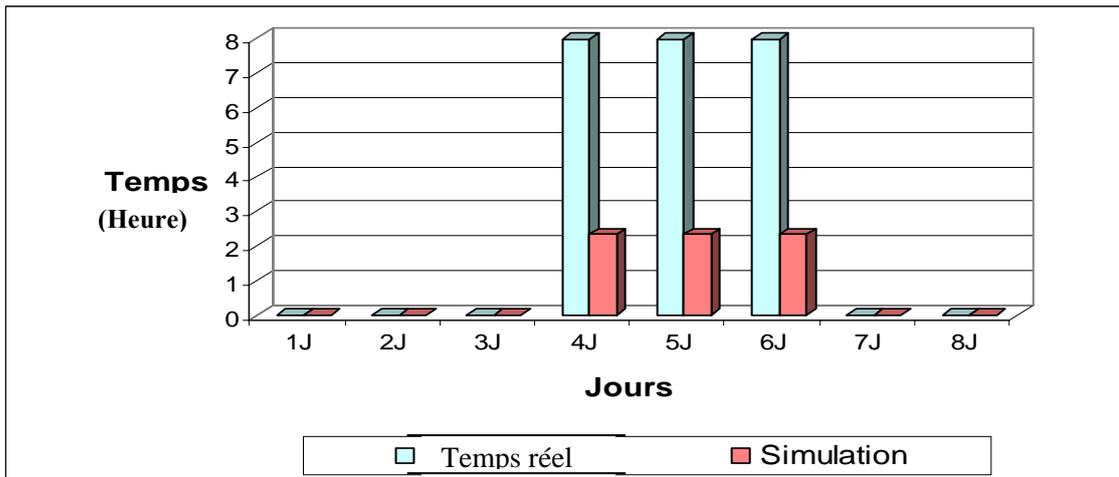


Figure.4.28. Comparaison entre le temps réel de nettoyage et le temps simulé.

• Mois d'AVRIL / 2006 :

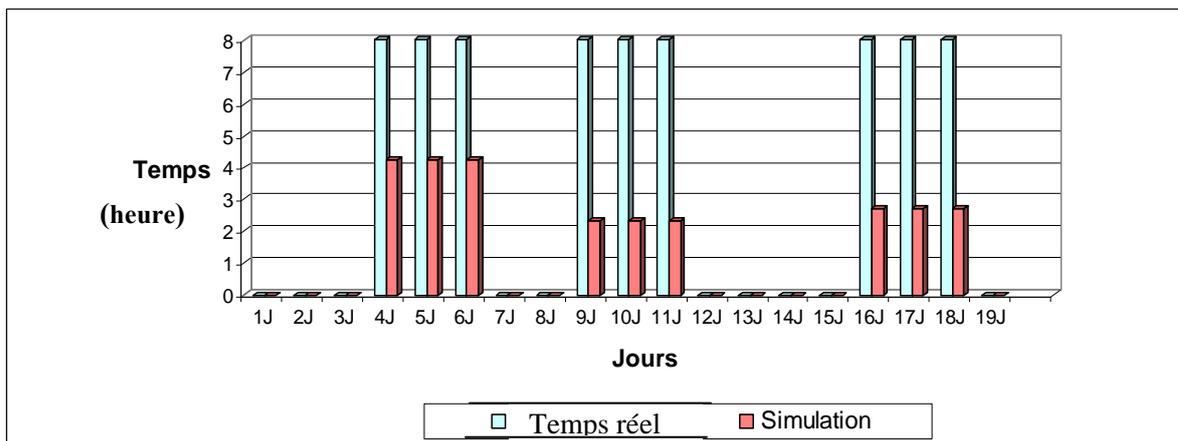


Figure.4.29. Comparaison entre le temps réel de nettoyage et le temps simulé.

• **Interprétation des résultats :**

D'après les histogrammes, on constate un grand écart entre le temps de nettoyage réel et le temps de nettoyage simulé.

Les principales causes sont :

- Réduction de la cadence des équipements.
- Influence de la durée du contrôle de qualité.
- Stratégie de l'entreprise.

Dans le but d'approfondir notre étude, nous avons jugé nécessaire de calculer le temps moyen du retard.

■ **Le temps moyen du retard pour chaque mois :**

➤ Janvier :  $(1.60 \times 3) + (3.75 \times 3) + (4.60 \times 3) + (4.00 \times 3) + (2.75 \times 3) = 50.10h/15j$

$$=3.34 \text{ h/j (1).}$$

- Février : 5.65 h/j. (2)
- Avril :  $(3.75 \times 3) + (5.51 \times 3) + (5.31 \times 3) = 43.71 \text{ h} / 9 \text{ j} = 4.86 \text{ h/j. (3)}$

De (1), (2) et (3)  $\longrightarrow 3.34 + 5.65 + 4.86 = 13.85 / 3 = 4.62 \text{ h/j.}$

Temps moyen du retard total est de : **4.62 h/j**

#### 4.11 CONCLUSION

Cette application effectuée à ERIAD Batna constitue une confrontation aux réalités industrielles. Elle a permis de valider la faisabilité de notre modèle et son apport industriel, lors du test applicatif de la méthodologie d'aide à la mise en place du modèle simul8.

Nous avons pu également tester l'accessibilité du modèle et de ses concepts, en observant la facilité de mise en place et de compréhension par l'utilisateur.

Le fait d'avoir un support méthodique pour récolter les données et les analyser, est un gain de temps considérable lors de la modélisation. Le support proposé permet à son utilisateur d'optimiser la durée de la phase de recherche des données nécessaires au modèle de simulation, pour ainsi passer davantage de temps sur les analyses de simulation.

De plus, le cheminement de réflexion suscité par l'ensemble des questions permet de reproduire mentalement certaines situations vécues et de réfléchir sur les choix effectués face à ces situations ou aléas. Ceci peut permettre à l'utilisateur de prendre un certain recul face à ses expériences passées, pour ensuite mieux réagir, voire anticiper les problèmes qu'il peut rencontrer, grâce au simulateur. Il aura ainsi une idée de l'évolution du nombre de pannes et de leur fréquence, du nombre de rebuts, de changements de série sur son poste et pourra s'y préparer, en fonction des objectifs de l'entreprise.

Une telle modélisation permet ainsi dans un premier temps, au niveau opérationnel, de sensibiliser les opérateurs à l'influence de certains aléas sur leur poste à piloter, ainsi qu'à l'impact de leur choix d'action sur leur système pour faire face à ces aléas. Dans un second temps, une fois sensibilisés, ils pourront sur le terrain, en temps réel être plus aptes et préparés à prendre les bonnes décisions au moment voulu grâce au modèle de simulation qui leur sert comme mécanisme de contrôle et suivi.

## **Conclusion et perspectives**

# **Conclusion générale**

## **CONCLUSION GENERALE**

Le contexte économique actuel impose à toute entreprise, d'obtenir de constants progrès dans le management quotidien et un degré de précision toujours plus fort dans les méthodes de gestion afin de gagner en taux de service client, tout en maintenant le niveau de stock le plus faible possible.

Les efforts d'amélioration en terme de coût et de qualité « sur » les produits restent essentiels. Mais les efforts d'optimisation « autour » du produit sont aujourd'hui primordiaux, pour améliorer la fiabilité des données de gestion, la fiabilité des délais de livraison annoncés, et par conséquent le taux de satisfaction des clients.

La connaissance de l'outil de production, mais plus encore, son contrôle, sont de plus en plus nécessaires pour optimiser la gestion de production.

Le recours à des outils d'aide au pilotage, comme la simulation des systèmes de production, devient une nécessité pour améliorer cette maîtrise de l'outil de production, pour éviter les erreurs dans les décisions et cela, à quelque niveau que ce soit de l'entreprise ou du cycle de vie d'un système de production.

Les progrès considérables de l'informatique ces dernières années ont favorisé le développement de la simulation, ont élargi ses domaines d'intervention et ont donné naissance à de nombreux outils logiciels. Mais, nous l'avons vu, même si la simulation est une technique de plus en plus utilisée en entreprise, il n'en reste pas moins qu'elle reste encore mal maîtrisée, et surtout, restreinte à un petit nombre d'utilisateurs. L'industriel est encore loin d'exploiter tout le potentiel de cette technique concernant les systèmes de production, du fait de la complexité des logiciels existants et des concepts qu'ils utilisent, de la lourdeur de mise en place, de son manque d'interactivité, et de sa difficulté à modéliser le pilotage.

Trop souvent, la simulation est utilisée sans méthodologie. Les résultats obtenus sont donc difficilement exploitables. L'expérimentateur doit effectuer lui-même l'analyse des résultats et déterminer quelles hypothèses il peut modifier et tester, ce qui n'est aisé lorsque les résultats ne sont pas clairs.

Il est donc difficile de confier la programmation à une personne de l'entreprise, à moins que celle-ci ait des connaissances dans le domaine de la modélisation, de la programmation, de la gestion de production (afin d'obtenir un modèle adapté, à l'image de la réalité du système manufacturier étudié) et puisse y consacrer surtout, beaucoup de temps. La simulation des systèmes de production reste encore souvent réservée à un cercle restreint de spécialistes (généralement des consultants extérieurs à l'entreprise).

Notre objectif était de répondre à certaines des lacunes de simulation, en proposant d'introduire le pilotage dans la simulation des systèmes de production.

Le travail présenté dans ce mémoire, traite le concept de pilotage en temps réel par simulation, afin de pouvoir offrir un moyen d'aider pour le contrôle et le suivi de la production. Nous avons tout d'abord analysé les conséquences de l'évolution de l'entreprise et de son environnement sur la performance industriel. De cette analyse, ont émergé les exigences actuelles de pilotage industriel et la nécessité de considérer l'ensemble des indicateurs de l'entreprise.

Afin de concrétiser cette idée, nous avons proposé un modèle qui prenne en compte aussi bien les aspects organisationnels que comportementaux du système de pilotage. L'aspect organisationnel est abordé à travers la définition des indicateurs et l'identification de leurs interactions. L'aspect comportemental porte sur la conception, l'exploitation ainsi que la révision des indicateurs.

Enfin un cas industriel a permis d'appliquer le modèle de pilotage par simulation au niveau de l'entreprise ERIAD BATNA. Cette application nous a permis de proposer, d'une part un mécanisme de contrôle du niveau d'organisation du système de production pour l'entreprise représenté par l'indicateur TRS, d'autre part un moyen de vérification et de suivi des plannings de production.

La plate forme présentée dans ce mémoire ne constitue qu'un début, reste maintenant à la finalisé. La première des perspectives de ce travail concerne

1. la formalisation des interactions du système d'indicateur avec son environnement de simulation, en particulier les échanges avec le système de pilotage doivent être bien définis.
2. Une autre réflexion peut concerner l'introduction du pilotage dans la simulation des systèmes de production, car cet outil pourrait être une aide au pilotage en temps réel. Ceci nécessite la création d'une interface avec une base de données comme un ERP par exemple.
3. Les centres de pilotage pourrait être amélioré et pourrait gagner en rendement, en les rendant plus « intelligent ». on utilisant le concept mutli-agent, qui sont les mieux adaptée à l'étude des centres de pilotage (CP) afin d'améliorer la plate-forme présentée.
4. Dans ce travail, nous avons limité notre champ d'étude à l'échange du flux de production dans un processus. Or, Ce travail doit donc être complété pour formaliser

les liaisons capables de lier l'entreprise aux différents marchés au sein desquels elle évolue. Cette extension doit permettre de formaliser de façon complète les réseaux d'entreprises.

---

*Références  
bibliographiques*

---

- [**Anthony 65**] R. Anthony, "Planning and Control Systems: A framework for analysis", Harvard University Press, 1966.
- [**Archimède 91**] B. Archimède, «Conception d'une architecture réactive distribuée et hiérarchisée pour le pilotage des systèmes de production » Thèse de doctorat de l'Université de Bordeaux I, 1991.
- [**Bitton 90**] Moïse Bitton, « *Ecograi : Méthode de conception et d'implantation de systèmes de mesure de performances pour organisations industrielles* », Thèse de Doctorat en Automatique, Université de Bordeaux I, soutenue le 13 septembre 1990.
- [**Barabel 96**] Michel Barabel, « *Un style de décision à la française* », Revue française de gestion, pages 159 à 170, Novembre-Décembre 1996.
- [**Ball 96**] Ball, P. D. (1996), "Introduction to discrete event simulation"., Conférence international DYCOMANS sur "Management and Control: Tools in Action", Algarve, Portugal, pp. 67-76.
- [**Banks, Carson&Nelson, 96**] Banks, J., J.S. Carson II, and B.L. Nelson (1996). "*Discrete -Event System Simulation*", 2<sup>ème</sup> ed"., Edition Prentice Hall, Upper Saddle River, NJ 1996.
- [**Berrah 02**] Lamia. Berrah, « *L'indicateur de performance concept et application* », Cepadant, 171p; 2002.
- [**Berrah, 97**] Lamia Berrah, « *Une approche d'évaluation de la performance industrielle- Modèle d'indicateur et techniques floues pour un pilotage réactif* », Thèse de Doctorat en Génie Industriel, Institut National Polytechnique de Grenoble, soutenue le 15 septembre 1997.
- [**Carrie 88**] Carrie, A. (1988), "Simulation of Manufacturing Systems", Edition John Wiley & Sons 1988.
- [**Christopher Chung 04**] Christopher A. Chung. "*Simulation modeling handbook : a practical approach*"., Edition CRC Press 2004
- [**Clivillé 04**] V. Clivillé, « Approche systémique et méthode multicritère pour la définition d'un système d'indicateurs de performance », Thèse de Doctorat de l'Université de Savoie, 2004.
- [**Dindeleux 98**] Régis Dindeleux, « *Propilot : une contribution à la modélisation des processus industriels* », Thèse de Doctorat en Electronique- Electrotechnique- Automatique, Université de Savoie, soutenue le 11 décembre 1998.
- [**De Toni 97**] A. De Toni, « An integrated production performance measurement system », Industrial Management and Data System, Vol. 97 (5), pp. 180-186. 1997.
- [**Grabot et al. 96**] Bernard Grabot, Pierre Huguet « *Reference models and object-oriented method for reuse in production activity control system design* », Computer in Industry, n°32, pp. 17-31, 1996.
- [**Grabot et al. 97**] Bernard Grabot, Pierre Huguet « *Modèles de référence et méthode orientée-objet pour la conception de systèmes de pilotage d'atelier* », JESA, vol. 31, n°1, pp 95- 124, 1997.
- [**Greif 98**] M. Greif, « l'usine s'affiche », éditions d'Organisation, 301 p, 1998
- [**Habchi et al. 99a**] G. Habchi et C. Berchet, « *Le pilotage industriel : concepts de base pour une approche intégrée* », Revue Française de Gestion Industrielle, volume 18, n°2, 1999.
-

**[Pegden, al 90]** Pegden, C.D, R.E. Shannon, and R.P. Sadowiski (1990). *Introduction to Simulation Using SIMAN*, Mc-Graw-Hill Inc., Princeton Road, NJ.

**[Pellet 85]** Xavier Pellet, « *Sur la hiérarchisation des décisions – Application à la conduite d’atelier* », Thèse de Doctorat en Automatique, Institut National Polytechnique de Grenoble, soutenue le 30 septembre 1985.

**[Pierreval 99]** Henry Pierreval, « *Proposition de typologie des décisions en temps réel agissant sur les flux des systèmes de production* », 2ème Congrès MOSIM’99, Annecy, p.331, octobre 1999.

**[Pellegrin 97]** Claude Pellegrin, « *Fondement de la décision de Maintenance* », Editions Economica, 1997.

**[Roubellat et al. 98]** F. Roubellat, C. Artigues et M. Villaumié, « *Un système d’aide à la décision pour l’ordonnancement en temps réel d’atelier* », Revue Française de Gestion Industrielle, vol. 17, n°4, 1998.

**[Roy 98]** Daniel Roy, « *Une architecture hiérarchisée multi- agents pour le pilotage réactif d’ateliers de production* », Thèse de Doctorat en Automatique - Productique, Université de Metz, soutenue le 15 janvier 1998.

**[Roy 85]** B. Roy, « *Méthodologie multi-critère d’aide à la décision* », Economica, Paris, 1985.

**[Roy et al. 93]** B. Roy, D.Bouyssou, « *Aide multi-critère à la décision : Méthode et cas* », Economica, Collection Gestion, Paris, 1993.

**[Rondreux 00].** J. Rondreux, « *L’analyse multicritère appliquée à la planification stratégique* », Travail et Méthodes, n°551, pp. 25-39, 2000.

**[Law et McComas 98]** Law, A.M., and M. G. McComas (1998). “*Simulation of Manufacturing Systems*,” Article, Conférence international *Winter Simulation 1998*, pp. 49-52.

**[Law et Kelton, 00]** Law, A.M. and Kelton, D.W. (2000), “*Simulation Modeling and Analysis*”, 3<sup>ème</sup> ed., Edition McGraw-Hill, New York 2000.

**[Law & Kelton 91]** Law, A. M. & Kelton, D. W. (1991), “*Simulation Modeling and Analysis, Industrial Engineering and Management Science*”, 2<sup>ème</sup> ed, Edition McGraw-Hill Inc.

**[Lemaître 81]** Pierre Lemaître, « *La décision* », Les Editions d’Organisation, collection Tormaction, 1981.

**[Le Moigne 74]** Jean-Louis Le Moigne, « *Les systèmes de décisions dans les organisations ?* », Presses Universitaires de France, 243 pages, 1974.

**[Le Moigne 77]** Jean-Louis Le Moigne, « *La théorie du Système Général* », Presses Universitaires de France, 1977.

**[Lorino 01]** P. Lorino, « Les indicateurs de performance dans le pilotage de l’entreprise », chapitre 3, pp 49-64, dans l’ouvrage *Indicateur de performance* par C. Bonnefous, A. Courtois, Hermès, 2001.

**[Lorino 91]** P. Lorino, « le contrôle de gestion stratégique : la gestion par les activités », Dunod, 1991.

---

[Nagi 91] R. Nagi, « *Design and operation of hierarchical production manufacturing systems* », Ph.D Thesis Report, University of Maryland (USA), 1991.

[Trentesaux 96] Damien Trentesaux, « *Conception d'un système de pilotage distribué, supervisé et multicritère pour les systèmes automatisés de production* », Thèse de Doctorat en Automatique-Productique, Institut National Polytechnique de Grenoble, soutenue le 24 janvier 1996.

[Kalfoun *et al.* 95] Mohamed Kalfoun et Ali Gharbi, « *Sélection d'une configuration d'un FMS; une approche multicritère* », Congrès International de Génie Industriel, Montréal, Octobre 1995.

[Kelton *et al.* 02] Kelton, D.W., Sadowski, R.P., and Sadowski, D.A. (2002), "*Simulation with Arena*", 2<sup>ème</sup> ed., Edition McGraw-Hill, New York 2002.

[Van Gigch 91] J. P. Van Gigch, « *System Design Modeling and Metamodelling* », Plenum Press, 1991.

[Youssef 98] A. Youssef, « *Architecture distribuée multi- experts avec contrôle hiérarchique pour le pilotage des systèmes de production* », Thèse de Doctorat en Productique Automatisée, Université de Metz, soutenue en juin 1998.