HAL
open science

Approche méthodologique pour l'intégration des systèmes contrôlés par le produit dans un environnement de juste-à-temps : Application à l'entreprise Trane

Hind El Haouzi

▶ **To cite this version:**

Hind El Haouzi. Approche méthodologique pour l'intégration des systèmes contrôlés par le produit dans un environnement de juste-à-temps : Application à l'entreprise Trane. Autre. Université Henri Poincaré - Nancy 1, 2008. Français. NNT : 2008NAN10135 . tel-01748527

HAL Id: tel-01748527

https://hal.univ-lorraine.fr/tel-01748527v1

Submitted on 29 Mar 2018

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

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

UNIVERSITÉ DE LORRAINE

AVERTISSEMENT

Ce document est le fruit d'un long travail approuvé par le jury de soutenance et mis à disposition de l'ensemble de la communauté universitaire élargie.

Il est soumis à la propriété intellectuelle de l'auteur. Ceci implique une obligation de citation et de référencement lors de l'utilisation de ce document.

D'autre part, toute contrefaçon, plagiat, reproduction illicite encourt une poursuite pénale.

Contact : ddoc-theses-contact@univ-lorraine.fr

LIENS

Code de la Propriété Intellectuelle. articles L 122. 4
Code de la Propriété Intellectuelle. articles L 335.2- L 335.10
http://www.cfcopies.com/V2/leg/leg_droi.php
http://www.culture.gouv.fr/culture/infos-pratiques/droits/protection.htm

Nancy-Université
Université Henri Poincaré

U.F.R. STMIA
Ecole Doctorale IAEM Lorraine
DFD Automatique

Centre de Recherche
en Automatique de Nancy

CRAN

UMR-7039
NANCY –UNIVERSITE
CNRS

TRANE®
Cooling and Heating Systems and Services

THESE

Présentée pour l'obtention du titre de

Docteur de l'Université Henri Poincaré, Nancy I

en Automatique, Génie Informatique

par

Hind EL HAOUZI

Approche méthodologique pour l'intégration des systèmes contrôlés par le produit dans un environnement de juste-à-temps:

Application à l'entreprise TRANE

Soutenue publiquement le 19/11/2008 devant le jury composé de :

RAPPORTEURS :

PR D. TRENTESAUX	UNIVERSITE DE VALENCIENNES ET DU HAINAUT-CAMBRESIS
PR H.PIERREVAL	INSTITUT FRANÇAIS DE MECANIQUE AVANCEE

EXAMINATEURS :

PR. V. THOMSON	MAC GILL UNIVERSITY MONTRÉAL (CANADA)
MDC F.OUNNAR	UNIVERSITE D'AIX-MARSEILLE
PR. A. THOMAS	UNIVERSITE HENRI POINCARE (DIRECTEUR DE LA THESE)
MDC, HDR. J.F PÉTIN	UNIVERSITE HENRI POINCARE (CO-DIRECTEUR)

INVITE :

S. HACQUARD	RESPONSABLE INDUSTRIALISATION TRANE

Dédicace

A mes proches et mes amis.....

A mon papa

Remerciements

J'adresse mes plus vifs remerciements à Monsieur Damien Trentesaux, professeur à l'université de Valenciennes et du Hainaut-Cambrésis et à Monsieur Henri Pierreval, professeur à l'Institut Français de Mécanique Avancée, pour m'avoir fait l'honneur d'étudier mes travaux de thèse et de les avoir cautionnés en qualités de rapporteurs.

Je tiens également à remercier Monsieur Vince Thomson, professeur à l'université Mac Gill de Montréal au canada, ainsi que Mme Fouzia Ounnar, Maître de conférences à l'université d'Aix-Marseille, pour avoir accepté de faire partie de ce jury.

Je tiens à remercier particulièrement mes directeurs de thèse Monsieur André Thomas, et Monsieur Jean-François Pétin pour leur aide inestimable, leur patience et leurs encouragements tout au long de ce travail. Leurs compétences ont été un atout indéniable à la réussite de ces travaux.

Je remercie l'ensemble des membres du CRAN pour les fructueuses discutions que j'ai pu avoir avec eux, pour leurs conseils et leur soutien.

Mes remerciements les plus sincères vont à Monsieur Stéphane Hacquard, responsable industrialisation TRANE, et mes collègues pour leurs encouragements et leur précieuse aide dans les différents projets que j'ai menés dans l'entreprise.

Je remercie aussi mes parents, mes sœurs et mon frère pour leur support de tous les instants, leur affection et leur joie de vivre.

Sommaire

I CONTEXTE INDUSTRIEL 17

1. INTRODUCTION AU CHAPITRE 1 17
2. ENTREPRISE 18
   - *2.1 Les produits 20*
   - *2.2 Le procédé 21*
   - *2.3 Synthèse du procédé de la fabrication 23*
3. ORGANISATION DE LA FABRICATION DE L'ENTREPRISE TRANE 25
   - *3.1 Qu'est ce que la DFT ? 25*
   - *3.2 Une organisation de la production basée sur le système Kanban 26*
   - *3.3 L'implantation physique dans l'usine et la synchronisation des flux 28*
   - *3.4 Le rôle de l'opérateur 28*
   - *3.5 Les principales lignes d'assemblage et feeders des deux usines : Golbey & Charmes 29*
   - *3.6 Synthèse de l'organisation selon la DFT 31*
4. LE PILOTAGE DE LA PRODUCTION A L'ENTREPRISE TRANE 31
   - *4.1 Mode de réponse au marché 31*
   - *4.2 Structure et modèle du produit 31*
   - *4.3 Ordres de production 33*
   - *4.4 Problèmes de synchronisation 34*
     - 4.4.1 Présentation de la grille GRAI 34
     - 4.4.2 Nos motivations… 35
     - 4.4.3 Modélisation de l'existant 35
     - 4.4.4 Analyse 37
   - *4.5 Synthèse du pilotage de la production TRANE 38*
5. CONCLUSION DU CHAPITRE 1 39

II SYNCHRONISATION DE FLUX EN GESTION DE PRODUCTION 41

1. INTRODUCTION AU CHAPITRE 2 41
2. LES FLUX DANS LA GESTION DE LA PRODUCTION 44
3. LA SYNCHRONISATION DES FLUX DANS UNE APPROCHE CENTRALISEE 45

3.1 De la régulation au pilotage ... *45*
3.2 De la gestion à l'optimisation de la production ... *47*
3.3 Le rôle des stocks dans la synchronisation des flux physiques ... *48*
4. LA SYNCHRONISATION DES FLUX DANS UNE APPROCHE DISTRIBUEE ... 49
4.1 Kanban ... *49*
4.2 Les flux synchrones ... *49*
4.3 L'utilisation des techniques de l'intelligence artificielle ... *52*
5. VERS UN PILOTAGE HYBRIDE CENTRE PRODUIT ... 54
5.1 Nécessité d'un pilotage hybride ... *54*
5.2 Hybridation par la notion de «Holon » ... *56*
5.3 Encadrement des décisions distribuées par des décisions centralisées ... *57*
5.4 Les systèmes contrôlés par le produit : ... *58*
5.4.1 Concept ... 58
5.4.2 Apport des technologies d'Auto-ID ... 59
6. CONCLUSION CHAPITRE II ... 62
III INGENIERIE DES SYSTEMES CONTROLES PAR LE PRODUIT ... 64
1. INTRODUCTION CHAPITRE 3 ... 64
2. EXPRESSION DU BESOIN ... 67
2.1 Approches académiques ... *67*
2.2 Approches industrielles ... *68*
3. LA MODELISATION DES SYSTEMES DE PILOTAGE ... 69
3.1 Notions de modélisation et de modèle ... *69*
3.2 La modélisation des systèmes de pilotage ... *70*
4. VALIDATION PAR SIMULATION (SIMULATION SED) ... 71
4.1 Les techniques d'évaluation ... *71*
4.1.1 Software in the loop ... 72
4.1.2 Hardware in the loop ... 72
4.1.3 Test de différentes stratégies (réutilisation) ... 73
4.2 La modélisation pour la simulation du système opérant ... *73*
4.3 Interface de communication et synchronisation de modèles de simulation ... *76*
5. CONCLUSION DU CHAPITRE 3 ... 78
IV PROPOSITION DE METHODOLOGIE DE CONCEPTION, VALIDATION ET D'INTEGRATION DES SCP ... 79
1. INTRODUCTION AU CHAPITRE 4 ... 79
2. DEFINE ... 80
3. MEASURE ... 81
4. ANALYSE ... 82
5. DESIGN (SOFTWARE IN THE LOOP) ... 82

5.1 Environnement de simulation dédié aux SCP : ... 83
5.2 Méthodologie de mise en œuvre des modèles de simulation ... 87
5.2.1 Principe de mise en œuvre ... 87
5.2.1.1 Niveau Analyse ... 87
5.2.1.2 Niveau Implémentation ... 88
5.2.2 Application dans le cadre de la DFT ... 88
5.2.2.1 La phase d'analyse ... 88
5.2.2.2 Phase implémentation ... 90
5.2.3 La prise en compte des concepts de réutilisabilité et de modularité ... 91
5.2.3.1 Introduction ... 91
5.2.3.2 Poste de travail ... 91
5.2.3.3 Opérateurs ... 93
5.2.3.4 L'automatisation de la création des modèles ... 94
5.2.4 Synchronisation d'une ligne et de ses feeders ... 95
5.2.4.1 Poste de la ligne à alimenter ... 96
5.2.4.2 Composant « IPK » ... 96
5.2.4.3 Poste en amont de l'IPK (feeder) ... 97
5.2.5 Synthèse ... 97
6. IMPLEMENTATION DES SYSTEMES CONTROLES PAR LE PRODUIT : ... 97
6.1.1 Multi-agents : ... 97
6.1.2 Applications web : ... 98
7. VERIFY (HARDWARE IN THE LOOP) ... 99
8. CONCLUSION DU CHAPITRE 4 ... 100
V VALIDATION SUR DEUX MODES DE GESTION : ... 101
INTRODUCTION AU CHAPITRE 5 ... 101
1. PROBLEMES DE SYNCHRONISATION LIES AU NRKANBAN ... 103
1.1 Define ... 103
1.2 Measure ... 104
1.3 Analyse ... 105
1.3.1 Choix du pilote ... 106
1.3.2 Choix du concept ... 107
1.4 Software in the loop : conception du système de pilotage ... 108
1.4.1 Modèle de simulation ... 108
1.4.2 Processus de simulation: Analyses des différents scenarii ... 109
1.5 Implémentation du système de contrôle ... 111
1.5.1 Couche données ... 111
1.5.2 Couche Métier ... 112
1.5.3 Couche client: ... 113
1.6 Hardware in the loop : validation du système de contrôle ... 114
1.6.1 La plate-forme d'émulation utilisée pour la validation du système de contrôle ... 114

1.6.2 Communication entre le modèle de simulation et le système de pilotage 115
1.6.2.1 La communication système de contrôle→ARENA 115
1.6.2.2 Communication ARENA → Système de contrôle 115
1.7 Déploiement dans l'usine 116
1.8 Retours sur expérience 118
1.8.1 Les gains directs : 118
1.8.1.1 Les gains réalisés 118
1.8.1.2 Les gains attendus 119
1.8.2 Les gains indirects 119
2. PROBLEMES DE SYNCHRONISATION LIES AU KANBAN (PROCESSUS DE DECOUPE) 119
2.1 Define 120
2.2 Measure 121
2.3 Analyse 123
2.3.1 Anomalies de l'ancien système 123
2.3.2 Activités à non valeur ajoutée 123
2.3.3 Points de synchronisation 123
2.4 Software in the loop 124
2.5 Implémentation du système de contrôle 124
2.5.1 Couche données 124
2.5.2 Couche métier: 125
2.5.2.1 Générer les étiquettes 125
2.5.2.2 Envoyer une demande 125
2.5.2.3 Envoyer un accusé de réception 126
2.5.3 Couche accès aux informations : Visibilité terrain 126
2.5.3.1 Historique entre 2 dates 126
2.5.3.2 Visualisations 126
2.5.3.3 Graphe des relances et retards 126
2.6 Hardware in the loop : validation du système de contrôle 128
2.7 Déploiement dans l'usine 128
2.8 Retours sur expériences 128
2.8.1 Les gains directs 129
2.8.2 Les gains indirects 129
3. DISCUSSION ET CONCLUSION DU CHAPITRE 5 132
VI CONCLUSION GENERALE 133
VII BIBLIOGRAPHIE 136
VIII ANNEXES 143

Liste des figures

FIGURE 1 : IMPLANTATION DES USINES TRANE 19
FIGURE 2 : LES DEUX USINES FRANÇAISES : 19
FIGURE 3: LES PRODUITS DE CHARMES 20
FIGURE 4 : LES PRODUITS DE GOLBEY 21
FIGURE 5 : SYSTEME FRIGORIFIQUE DE BASE FIGURE 6 : DIAGRAMME DU CYCLE 22
FIGURE 7 : L'EVAPORATEUR **FIGURE 8 : LE COMPRESSEUR** 22
FIGURE 9 : CONDENSEUR A EAU **FIGURE 10 : DETENDEUR ELECTRONIQUE** 23
FIGURE 11 : L'ORGANISATION DANS LES USINES DE CHARMES ET GOLBEY 24
FIGURE 12 : LES CIRCULATIONS DES KANBANS (PULL SEQUENCE CHAIN) 27
FIGURE 13 : IMPLANTATION DANS UNE USINE DFT ET LA SYNCHRONISATION DES FLUX 28
FIGURE 14 : IMPLANTATION DES DEUX USINES ET LES DIFFERENTS FLUX INFO / PHYSIQUE 30
FIGURE 15 : CYCLE DE VIE D'UNE COMMANDE CLIENT 32
FIGURE 16 : STRUCTURE DE PRODUIT 32
FIGURE 17 : REPRESENTATION DE LA STRUCTURE PRODUIT PAR LE FORMALISE UML 33
FIGURE 18 : ANALYSE GRAI 37
FIGURE 19 : MODELE DU SYSTEME D'ENTREPRISE 42
FIGURE 20 : LES TROIS NIVEAUX DE PLANIFICATION 44
FIGURE 21 : LES NIVEAUX DE PLANIFICATION DANS MRP 2 (THOMAS A., 2004) 46
FIGURE 22 : DESYNCHRONISATION DES PLANS MRP 2, EXEMPLE DU PDP ET DE L'ORDONNANCEMENT (GENIN P., ET AL, 2005) 47
FIGURE 23 : LE DEPLOIEMENT DE LA DECISION AVEC UN APS 48
FIGURE 24 : LA FONCTION DE DECOUPLAGE DU STOCK (THOMAS A., 2007) 48
FIGURE 25 : PRINCIPE D'OPTIMISATION GLOBALE DES FLUX VEHICULENT (MUHL E., 2002) 51
FIGURE 26 : LES FONCTIONS D'UN MES 55
FIGURE 27 : LES TROIS TYPES PRINCIPAUX D'HOLONS DANS L'ARCHITECTURE PROSA 57
FIGURE 28 : SEPARATION DES POLES MANUFACTURING ET BUSINESS (BAÏNA S. AND MOREL G., 2006) 58
FIGURE 29 : MODELE INITIAL DE L'HOLON 59
FIGURE 30 : LE PASSAGE A UNE BOUCLE DE CONTROLE INCLUANT LE PRODUIT INFORMANT 60
FIGURE 31 : IMPACT DE L'IDENTIFICATION AUTOMATIQUE SUR LES SYSTEMES CLASSIQUES DE GESTION DE PRODUCTION 61

FIGURE 32: IMPLEMENTATION DES LECTEURS RFID DANS LE CONTEXTE DE LA DFT 65
FIGURE 33 : APPROCHE PROCESSUS PRECONISEE PAR LA NORME ISO 9001 65
FIGURE 34: TECHNIQUES D'EVALUATION (ISERMANN *ET AL.*1999) 72
FIGURE 35: ECHELLE DE LA REUTILISABILITE 73
FIGURE 36 : RELATIONS ENTRE MODELE DE REFERENCE, MODELE DE SIMULATION ET SYSTEME REEL 76
FIGURE 37 : GUIDE DE CONCEPTION ET DE VALIDATION DES SCP 80
FIGURE 38 : DIAGRAMME DE CAS D'UTILISATION DE LA PHASE DEFINIR 81
FIGURE 39 : DIAGRAMME DE CAS D'UTILISATION EXPLIQUANT LA DEMARCHE DE RAFFINEMENT DES EXIGENCES 82
FIGURE 40 : DIAGRAMME UML DES COMPOSANTS PHYSIQUES 83
FIGURE 41 : DIAGRAMME UML DES COMPOSANTS LOGIQUES 84
FIGURE 42 : META-MODELE D'UN COMPOSANT DECISIONNEL 84
FIGURE 43 : DIAGRAMME UML DES COMPOSANTS INFORMATIONNELS 85
FIGURE 44 : STRUCTURE GENERIQUE DU SYSTEME D'INFORMATION (IEC 62264) 85
FIGURE 45 : LA PLATEFORME DE SIMULATION 86
FIGURE 46 : LA PROCEDURE DE SYNCHRONISATION 87
FIGURE 47 : CYCLE DE VIE ASCI-PH (IJPE) 88
FIGURE 48 : DIAGRAMME DE CLASSE DU SOUS-SYSTEME PHYSIQUE 89
FIGURE 49 : DIAGRAMME DE CLASSE DU SOUS SYSTEME DECISIONNEL 89
FIGURE 50 : DIAGRAMME DE CLASSE DU SOUS SYSTEME INFORMATIONNEL 90
FIGURE 51 : POSTE DE TRAVAIL DANS ARENA 92
FIGURE 52 : FONCTIONNEMENT D'UN POSTE DE TRAVAIL 92
FIGURE 53 : CONFIGURATION DE L'OPERATEUR 93
FIGURE 54 : COMPORTEMENT D'UN OPERATEUR 94
FIGURE 55 : DIAGRAMME DE SEQUENCE DE LA CREATION D'UN ENVIRONNEMENT DE SIMULATION 95
FIGURE 56 : MECANISME DE SYNCHRONISATION 96
FIGURE 57 : INTERFACE DU COMPOSANT IPK 96
FIGURE 58 : LE MODELE LOGIQUE D'ARCHITECTURE 3-TIERS 98
FIGURE 59 : NOTRE DEMARCHE DE MODELISATION 101
FIGURE 60 : LE MODELE KANO 105
FIGURE 61 : LA MATRICE DE PONDERATION ET LE RESULTAT DU PARETO 106
FIGURE 62 : LE PILOTE TRANE FAN 107
FIGURE 63 : GESTION DES DEMANDES 108
FIGURE 64 : LE MODELE DE SIMULATION DU FEEDER TRANE FAN 109
FIGURE 65 : ANALYSE STATIQUE SUR LE FEEDER FIGURE 66 : ANALYSE STATIQUE SUR LA LIGNE 110
FIGURE 67 : STRUCTURE DU SYSTEME D'INFORMATION 112
FIGURE 68 : PAGE DES DEMANDES SUR LE POSTE 1 113
FIGURE 69 : INTERFACE UTILISATEUR DU SYSTEME DEVELOPPE 114

FIGURE 70 : L'ARCHITECTURE DE LA PLATE-FORME D'EMULATION 115
FIGURE 71 : LE DIGRAMME DE SEQUENCE DU PROTOCOLE DE COMMUNICATION 116
FIGURE 72 : LE TEMPS D'ACCES A LA DOCUMENTATION 117
FIGURE 73 : OMS ET BOM ON-LINE 118
FIGURE 74 : « PROCESS MAP » DU PROCESSUS DE GESTION DES KANBANS TOLERIE 120
FIGURE 75 : PROCESSUS D'ENVOI DE LA DEMANDE ET DES CONTAINERS VIDES DE CHARMES A GOLBEY 121
FIGURE 76 : DU PROCESSUS DE FABRICATION DE GOLBEY A LA LIVRAISON DES COMPOSANTS 122
FIGURE 77 : BOUCLE DE SUIVI DES KANBANS QUI TRANSITENT ENTRE CHARMES ET GOLBEY 122
FIGURE 78 : MODELE CONCEPTUEL DE DONNEES 124
FIGURE 79 : DIAGRAMME DU CAS D'UTILISATION (ACCES AUX DONNEES DE L'E-KANBAN) 127
FIGURE 80 : VISUALISATION DES RELANCES ENCOURS ET DES RELANCES EN RETARDS 127
FIGURE 81 : LES GRAPHIQUES DES RELANCES EN RETARDS 128
FIGURE 82 : ANALYSE DU MOIS DE JANVIER ET LE MOIS D'AOUT 130
FIGURE 83 : L'EVOLUTION DE LA QUANTITE D'ARTICLES DEMANDEE PAR CHARMES 131

Liste des tableaux :

TABLEAU 1 : LES DIFFERENTS ORDRES A OUVRIR EN FONCTION DES TYPES D'UNITES : 34
TABLEAU 2. MODELE « ENTERPRISE INTEGRATION CAPABILITY MODEL » (HOLLOCKS *ET AL.* 1997)..... 63
TABLEAU 3 : LES ACTEURS DIRECTS (CLIENTS/ FOURNISSEURS) DE L'USINE TRANE..... 103
TABLEAU 4 : LE DIAGRAMME D'AFFINITES PRESENTANT LES OPPORTUNITES DU RFID ET LES CTQ..... 104
TABLEAU 5 : UN EXEMPLE DE PROGRAMME DIRECTEUR DE PRODUCTION (PDP) 109
TABLEAU 6 : PRESENTATION DES GAINS DIRECTS 129

Annexes

ANNEXE 1: EXEMPLE D'UN SIPOC 143
ANNEXE 2: DIAGRAMME D'AFFINITES 144
ANNEXE 3: KANO MODEL 145
ANNEXE 4 : UN EXEMPLE DE L'ARBRE DES CTQ 146
ANNEXE 5 : GENERATION DES MODELES DE SIMULATION 147
ANNEXE 6 : DIAGRAMME DE CLASSE DE L'APPLICATION D'AUTOMATISATION 147
ANNEXE 7 : DESCRIPTION DES TABLES DU PILOTE TRANE FAN 148
ANNEXE 8 : DESCRIPTION DES PRINCIPALES PAGES WEB DE L'APPLICATION TRANE FAN 150
ANNEXE 9 : LA COMMUNICATION ENTRE ARENA ET L'APPLICATION WEB 151
ANNEXE 10 : LES DIFFERENTES CAPTURES D'ECRAN DES INTERFACES UTILISATEURS DU « E-KANBAN » 154

Introduction

Innovations technologiques, demandes clients de plus en plus versatiles, cycles de vie des produits de plus en plus courts, sont autant de facteurs qui ont poussé les entreprises à s'organiser de manière réactive et à remettre en cause une structure purement hiérarchique des fonctions de décision du pilotage des flux de produits. Ces décisions sont organisées généralement selon une structure à cinq niveaux (Vollmann T.E. et al., 1997). Dans de telles structures organisationnelles, les décisions sont de plus en plus détaillées au fur et à mesure que l'on se rapproche du système physique, et sont prises sur des horizons de temps de plus en plus courts. Cette approche correspond au pilotage centralisé et reste valable en présence d'un environnement relativement stable.

Récemment les recherches ont orienté les entreprises vers des structures distribuées où les décisions sont prises localement par des entités dotées de capacité de perception et d'action, ce qui permet d'augmenter la réactivité du système. Cependant, celles-ci posent le problème de la cohérence globale des décisions que cette autonomie peut mettre en péril. De nouvelles structures sont alors apparues comme un compromis entre une structure purement distribuée et une structure centralisée pour assurer autonomie et réactivité avec cohérence globale. Ce compromis requiert de nouvelles architectures de systèmes intelligents, favorisant l'adaptabilité au produit, d'organisations en réseaux, devant fournir à temps et à qualité constante une quantité variable d'un produit personnalisé, fabriqué selon des procédés différents sur des sites parfois distants. C'est dans ce cadre que le concept « Holonique » présenté par Koestler (Kosestler A., 1976) et, en particulier, le paradigme du Système Contrôlé par le Produit (SCP) sont apparus.

L'émergence de ces paradigmes a été suivie par celle des technologies de type RFID (Radio Frequency IDentification) qui laissent entrevoir un potentiel certain pour les entreprises manufacturières (Garcia A., et al, 2003).En effet, ces équipements vont permettre une identification des produits, d'où un accroissement des possibilités en termes de traçabilité, et vont également modifier la gestion des informations tout au long de la chaîne logistique, et donc permettre une optimisation du pilotage des flux physiques. Par cette technologie le concept de systèmes contrôlés par le produit peut être instrumenté. Les produits deviennent en effet porteurs, de manière directe ou indirecte, de leurs propres informations (informations structurelles mais aussi informations de gestion) et peuvent ainsi être considérés comme un vecteur potentiel de synchronisation des flux physiques et des flux d'informations. Ceci nous laisse à penser que les principes initiaux du MRP2 (Orlicky J.,

1975) peuvent être remis, au moins partiellement, en cause, notamment en favorisant une prise de décision locale autonome. Néanmoins, pour résoudre le **problème de synchronisation flux physique/flux d'informations**, il s'agira de définir les modèles et architectures de systèmes, assurant que ces produits puissent mettre à disposition au moment opportun les informations pertinentes strictement nécessaires.

En parallèle de ces évolutions et pour répondre à des besoins de réduction de coût (stockage, industrialisation..), diverses mises en œuvre de la philosophie « Juste à Temps » (JiT) ont vu le jour et des méthodes comme Demand Flow Technology (DFT) (Costanza, 1996) sont apparues. Cette méthodologie implique une gestion logistique en flux tirés et conduit à une standardisation stricte des processus dont la conception et le dimensionnement sont vérifiés mathématiquement afin d'assurer une adaptabilité au profil de la demande. Néanmoins, ces calculs ne permettent pas de prendre en compte le caractère dynamique de la ligne. En effet, des files d'attente peuvent se créer dues, d'une part, au déséquilibre de charge entre les différents postes d'une ligne et, d'autre part, aux problèmes liés à la synchronisation des flux matières entre une ligne d'assemblage et ses lignes d'approvisionnement **(synchronisation physique/physique).**

Cette thèse a été réalisée au sein du Centre de Recherche en Automatique de Nancy « CRAN ». Elle s'inscrit dans une des thématiques de l'équipe Systèmes de Production Ambiants « SYMPA » et en particulier dans le projet Systèmes Contrôlés par le Produit « SCP ». Le but de ce projet est de définir, développer et déployer des méthodes d'automatisation ayant pour objet le contrôle et la gestion par le produit des procédés industriels en entreprise.

Cette thèse a une vocation industrielle dans le sens où elle a été réalisée en partenariat (contrat CIFRE) avec une entreprise internationale, TRANE, qui fabrique et commercialise une très large gamme de produits destinés à la climatisation et la réfrigération ainsi que des ensembles de gestion informatisés permettant le contrôle de la boucle complète de conditionnement d'air. Cette société d'origine américaine, est aujourd'hui implantée dans une dizaine de pays. Elle compte 27 sites de production tous organisés selon la méthode DFT. Le travail réalisé dans le cadre de cette thèse, est donc amené à être déployé dans plusieurs usines.

L'étude que nous avons choisi de réaliser a pour objectif la mise en place d'un système de contrôle par le produit pour résoudre les problèmes de synchronisation physique/physique induit par la méthode DFT et les problèmes de synchronisation flux physique/flux d'informations induits par la nature différente de ces deux flux.

Toutefois la mise en place d'un SCP ne peut être réalisée de la même façon que pour les systèmes de pilotage centralisés (approche « big bang », « déploiement échelonné », …)

L'intégration de tels systèmes doit prendre d'abord en compte la cohérence entre les différents éléments le constituant. Ainsi les agents matériels de terrain contraints par les lois physiques du procédé devront « interopérer » avec les agents logiciels dotés de capacités d'autonomie et de communication afin de contrôler la dynamique d'interactions entre agents de production et logistique pour assurer les propriétés d'agilité ciblées.

Le premier chapitre de la thèse est pour nous l'occasion de décrire en détail les éléments sur lesquels se sont appuyés nos réflexions, à savoir le procédé de fabrication au sein de l'entreprise TRANE, l'organisation de ses ateliers suivant la méthode du juste à temps DFT et les différents modes de pilotage dans l'entreprise. A l'issue de ce chapitre émerge deux problèmes : le problème de synchronisation flux physique/physique et celui de la synchronisation flux physique/flux d'informations.

Le second chapitre du document s'attarde donc sur ces deux problèmes et présente le travail bibliographique de la thèse. Tout d'abord, nous nous focalisons sur la définition et la présentation des différentes structures de pilotage, ce qui nous permettra de positionner la classe de systèmes que nous considérons dans notre étude. Après avoir expliqué les problèmes de synchronisation et l'apport du concept du système contrôlé par le produit dans la résolution de ces problèmes, ce chapitre sera l'occasion de montrer les difficultés qu'ont eues les auteurs de la littérature à définir un cadre générique ou une méthodologie de construction et d'intégration d'un système contrôlé par le produit.

Le troisième chapitre est consacré à la définition de la problématique scientifique qui fait suite aux problèmes induits par le contexte industriel mais également aux lacunes mises en évidence quant aux travaux de recherche sur les méthodes utiles pour la conception et l'implémentation, à l'échelle industrielle, de systèmes contrôlés par le produit. Ce chapitre présentera donc l'état de l'art sur les approches existantes et utilisables pour la construction de SCP.

La proposition d'une méthodologie de conception et d'intégration des systèmes contrôlés par le produit palliant les lacunes mises en avant dans le chapitre précédent est présentée dans le quatrième chapitre. Nous commençons par décrire l'approche proposée qui combine des approches courantes de la communauté « Production et Logistique Agiles » issues du génie automatique, du génie informatique et de l'Intelligence Artificielle Distribuée avec des approches d'ingénierie système, en particulier l'approche six-sigmas (Antony J. and Banuelas R., 2002).

Le dernier chapitre a pour objectif d'illustrer notre approche sur deux cas d'application réels et de présenter les travaux de développement qui ont été réalisés lors de cette thèse. Les résultats et retours d'expérience sur l'utilisation industrielle de l'approche proposée seront également présentés.

Nous conclurons par une discussion sur la pertinence, tant technique que théorique, de notre approche. Enfin, nous présenterons des perspectives, notamment relatives au degré de formalisation et de généricité de la méthode proposée mais également du système contrôlé par le produit développé.

I Contexte industriel

1. INTRODUCTION AU CHAPITRE 1

Nous avons montré dans l'introduction générale que les obligations de la flexibilité ainsi que les nouvelles possibilités offertes par les systèmes d'information, conduisent à envisager des solutions plus distribuées pour les systèmes de pilotage.

En effet, des technologies comme les RFID (Radio Frequency IDentification) vont modifier la gestion des informations tout au long de la chaîne logistique. Grâce à elles les produits portant leurs propres informations pourraient unifier les flux physiques et les flux informations. Ils garantiraient, donc, leur traçabilité dans le temps et permettraient de gérer la complexité d'une grande personnalisation des produits. Cependant, des questions subsistent. Comment assurer la cohérence entre le monde logique traitant les flux d'informations et le monde réel composé d'objets des flux physiques ? (des flux de nature différentes : vitesse, volume etc). Comment valider la pertinence de telles structures dans un environnement industriel (ROI,…) ? Quel sera leur positionnement par rapport aux structures hiérarchiques ? (faut-il les remplacer ? construire un système hybride ?).

Ces questions nous sont apparues dans l'entreprise TRANE, groupe industriel dans lequel nous avons effectué notre recherche. Ce chapitre est dédié à sa présentation.

Dans la première partie, nous présentons la société TRANE. Ceci-ci nous permettra d'appréhender son organisation en termes de nombre de sites mais aussi en terme de volume et de variété des produits. Cette variété implique des procédés plus au moins automatisés, mais globalement standardisés selon la méthode Demand Flow Technology « DFT », technique qui induit des flux tirés par la demande client.

En deuxième partie, nous nous intéressons plus particulièrement à l'organisation des lignes d'assemblage qui s'appuient sur la DFT. Cette partie, sera donc structurée pour décrire les différents concepts du Juste à Temps utilisés, afin de donner une vision des éléments devant être pris en compte dans nos réflexions.

En troisième partie, nous aborderons les différents modes de pilotage pratiqués au sein de l'entreprise TRANE et nous en déduirons la problématique industrielle.

2. ENTREPRISE

TRANE est une société internationale qui fabrique des équipements de climatisation, de ventilation et de chauffage. Elle produit aussi des systèmes de contrôle et de gestion pour les maisons individuelles, les bureaux et les complexes industriels. L'histoire de la société débute en 1885 par une petite entreprise familiale de plomberie située à La Crosse, dans l'état du Wisconsin aux Etats-Unis. TRANE James, norvégien d'origine, est alors considéré comme l'un des meilleurs plombiers de la région. En 1913, James et son fils «Reuben fondent The TRANE Company.

Dès lors, le dynamisme créateur de TRANE s'est traduit par une grande série de « premières », comme la première batterie à ailettes ou la première utilisation de compresseurs rotatifs à vis dans ses produits.

Quelques dates importantes :

- 1885 : Début de l'activité plomberie par James TRANE
- 1913 : Création de la société TRANE
- 1958 : Implantation de TRANE en Europe, siège installé à Golbey (88)
- 1964 : Construction de l'usine de Golbey
- 1974 : Construction de l'usine de Charmes
- 1984 : TRANE fusionne avec American Standard Companies.
- 1995 : American Standard est coté en bourse (NYSE : ASD)
- 2001 : Alliance stratégique mondiale avec Daikin
- 2008 : Rachat de l'entreprise par le groupe Ingersoll Rand

Aujourd'hui, grâce à une dynamique de progression constante, l'usine de Golbey et celle de Charmes sont certifiées ISO 9001-2000 et 14001-1996.

TRANE est implantée dans le monde entier : 27 usines au total (Figure 1)

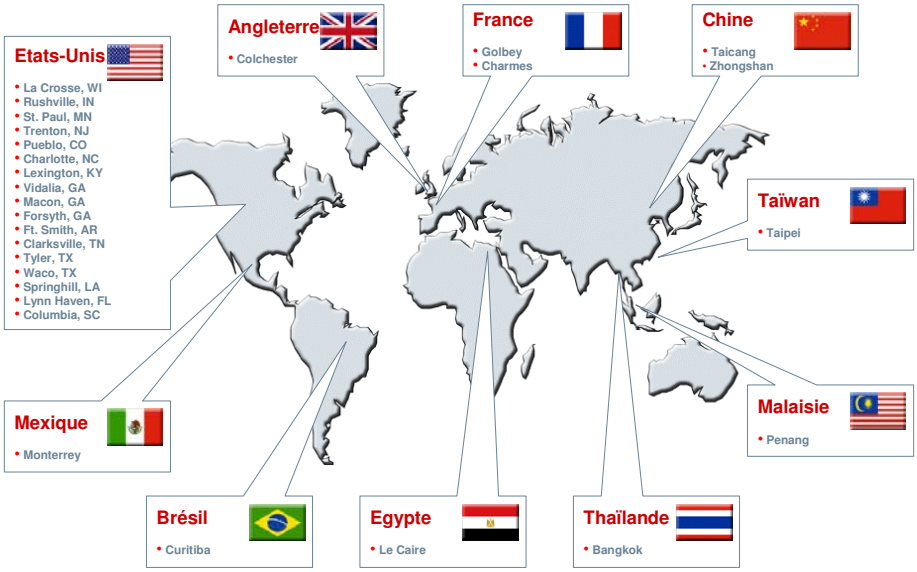


Figure 1 : Implantation des usines TRANE

Charmes

Golbey

Charmes :

Surface : 17,000 m²

Produits: Refroidisseurs de liquides à compresseur à vis

(200 to 1500kW P. Frigo.)Production : 4500 Unités/an

Golbey:

Surface : 16,000 m²

Produits : Unités de toiture, ventilo-convecteurs, refroidisseurs de liquide Scroll (< 250kW P. Frigo.)

Production : 65500 Unités/an

Figure 2 : Les deux usines françaises :

En France la société TRANE emploie 1400 employés, dont 1100 répartis sur deux usines dans les Vosges et 300 sur 17 bureaux de vente (Figure 2).

2.1 Les produits

TRANE fabrique et commercialise une très large gamme de produits destinés à la climatisation et la réfrigération ainsi que des ensembles de gestion informatisés permettant le contrôle de la boucle complète de conditionnement d'air.

Les produits de Charmes :

Les unités qui utilisent la condensation par eau (WaterCooled).

En exemple la photo d'une unité 'RTHD'

Les unités qui utilisent la condensation par air (AirCooled).

En exemple la photo d'une unité 'RTAD-HR'

Figure 3: Les produits de Charmes

Cette usine fabrique des refroidisseurs de liquides de fortes puissances (<1500Kw froid) (Figure 3). Ces machines sont appelées « Chillers ». Elles sont classées en fonction de la façon par laquelle le réfrigérant condense.

Trois grandes familles d'unités sont fabriquées à Golbey : (voir la figure 4)

Les unités Scroll qui sont des refroidisseurs de liquides de moyennes puissances.

En exemple la photo d'une unité 'CGAN'

Les unités ROOFTOP qui conditionnent des grands volumes d'air.

En exemple la photo d'une unité 'Voyager III'

Les unités 'FANcoil' sont des ventilo-convecteurs qui proposent une large gamme de produits

Unité 'HFR'

Unité 'FCC'

Figure 4 : Les produits de Golbey

2.2 *Le procédé*

Malgré une grande variété des produits, le procédé de fabrication reste néanmoins invariant. Il s'agit tout d'abord d'un système fermé comme l'indique le schéma de la Figure 5 où la température à laquelle le fluide frigorigène s'évapore et se condense est contrainte par la pression.

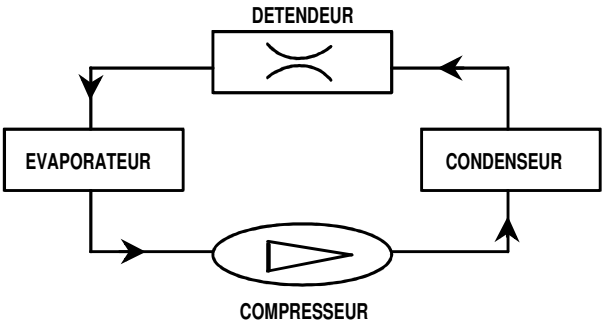


Figure 5 : Système frigorifique de base

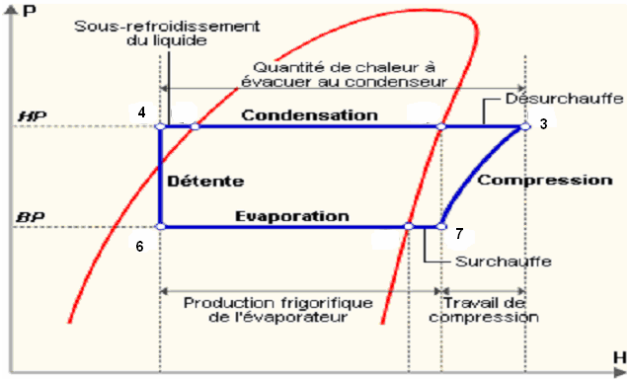


Figure 6 : Diagramme du cycle Frigorifique (Mollier)

Ce système est constitué, tout d'abord, d'un évaporateur (voir figure 5) dans lequel le fluide frigorigène s'évapore totalement en absorbant la chaleur provenant du circuit d'eau qui se refroidit. Dans un deuxième temps, le gaz formé est encore légèrement réchauffé par le fluide extérieur; c'est ce qu'on appelle la phase de surchauffe (voir la figure 6)

Ensuite, le fluide frigorigène arrive à l'entrée du compresseur (figure 7) à l'état gazeux, sous basse pression et basse température. La compression permet d'élever sa pression et sa température pour assurer les conditions nécessaires à la condensation du fluide.

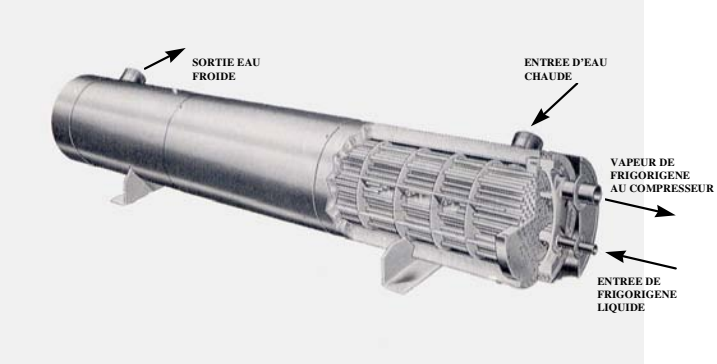


Figure 7 : L'évaporateur

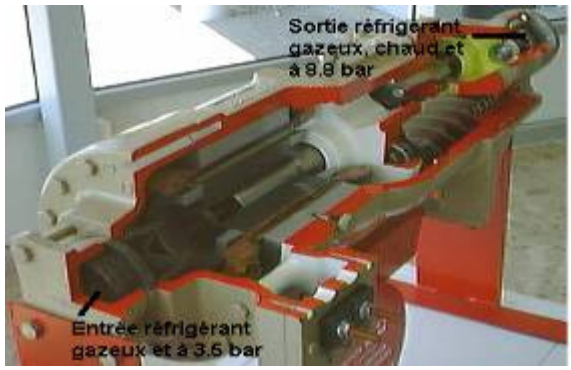


Figure 8 : Le compresseur

Le gaz comprimé, contenant la chaleur extraite de l'eau ainsi que la chaleur venue du compresseur, est envoyée dans le condenseur (figure 9) et cède sa chaleur à l'eau du circuit extérieur. Les vapeurs de fluide frigorigène se refroidissent ("désurchauffe") (figure 6) puis le fluide se condense. Le fluide liquide se refroidit de quelques degrés (sous-refroidissement) avant de quitter le condenseur.

L'organe « détendeur » (voir figure 10) va diminuer la pression du réfrigérant et par conséquent sa température afin de retrouver à nouveau toutes les caractéristiques pour que ce dernier puisse retourner dans l'évaporateur. Le circuit réfrigérant est alors bouclé.

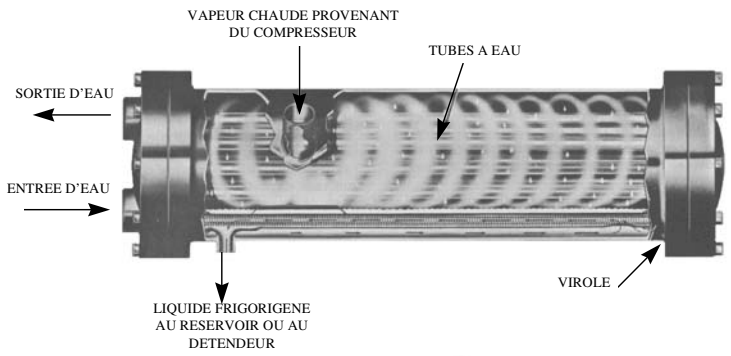


Figure 9 : Condenseur à eau

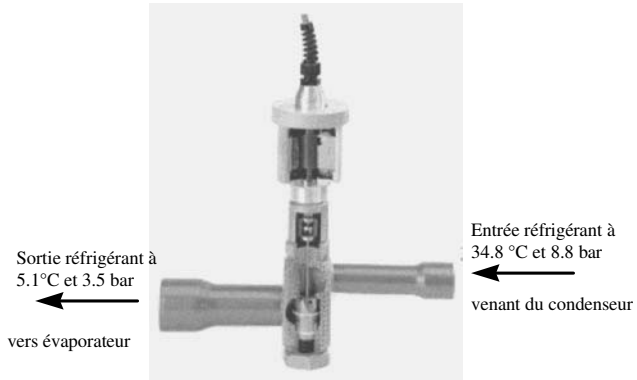


Figure 10 : Détendeur électronique

Les unités de type « Air Cooled » fonctionnent sur le même principe, mis à part que la condensation du fluide frigorigène gazeux se fait grâce à un condenseur à air, appelé plus communément batterie.

C'est en effet une batterie constituée de tubes et d'ailettes sur lesquels l'air circule. Le fluide, quant à lui passe à l'intérieur des tubes. L'air est propulsé à l'aide de ventilateurs hélicoïdes.

Les évaporateurs fonctionnent sur le même principe et sont fabriqués de la même manière, quel que soit le type de machines. Seule leur taille change suivant la puissance de l'unité fabriquée.

2.3 Synthèse du procédé de la fabrication

A partir de cette description nous pouvons constater qu'il y a 4 invariants dans chaque machine: le compresseur, les 2 échangeurs de chaleur (évaporateur, condensateur) et le détendeur. La complexité de ces composants (principalement les 3 premiers) fait qu'ils sont assemblés dans des lignes dédiées que nous appelons « feeders» pour alimenter la ligne principale d'assemblage du produit fini au moment opportun (d'une manière synchrone.) Compte tenu de leurs dimensions, un stock au point de synchronisation est très difficile à envisager. Les matières premières sont principalement le cuivre pour les échanges thermiques, la tôlerie pour les mêmes raisons mais aussi pour l'aspect final du produit et la mousse qui est un élément important pour l'isolation des échangeurs (aspect vibration)...etc.

L'organisation de la production suit le modèle de la figure 11 où le premier processus est le processus de « Réception & contrôle des composants achetés de l'extérieur ». En entrée de ce processus nous avons le numéro série du composant, les contrôles à réaliser, la date de péremption et en sortie le numéro de l'article TRANE, la quantité reçue, date de réception et le certificat matière. Après ces contrôles et la déclaration de réception dans l'ERP, les matières premières seront soit, stockées au magasin soit directement livrées sur les lignes d'assemblage. Le processus suivant concerne la préparation des dossiers de fabrication.

Ensuite, le processus de séquencement permet de donner l'ordonnancement de la ligne et ceux de certains feeders.

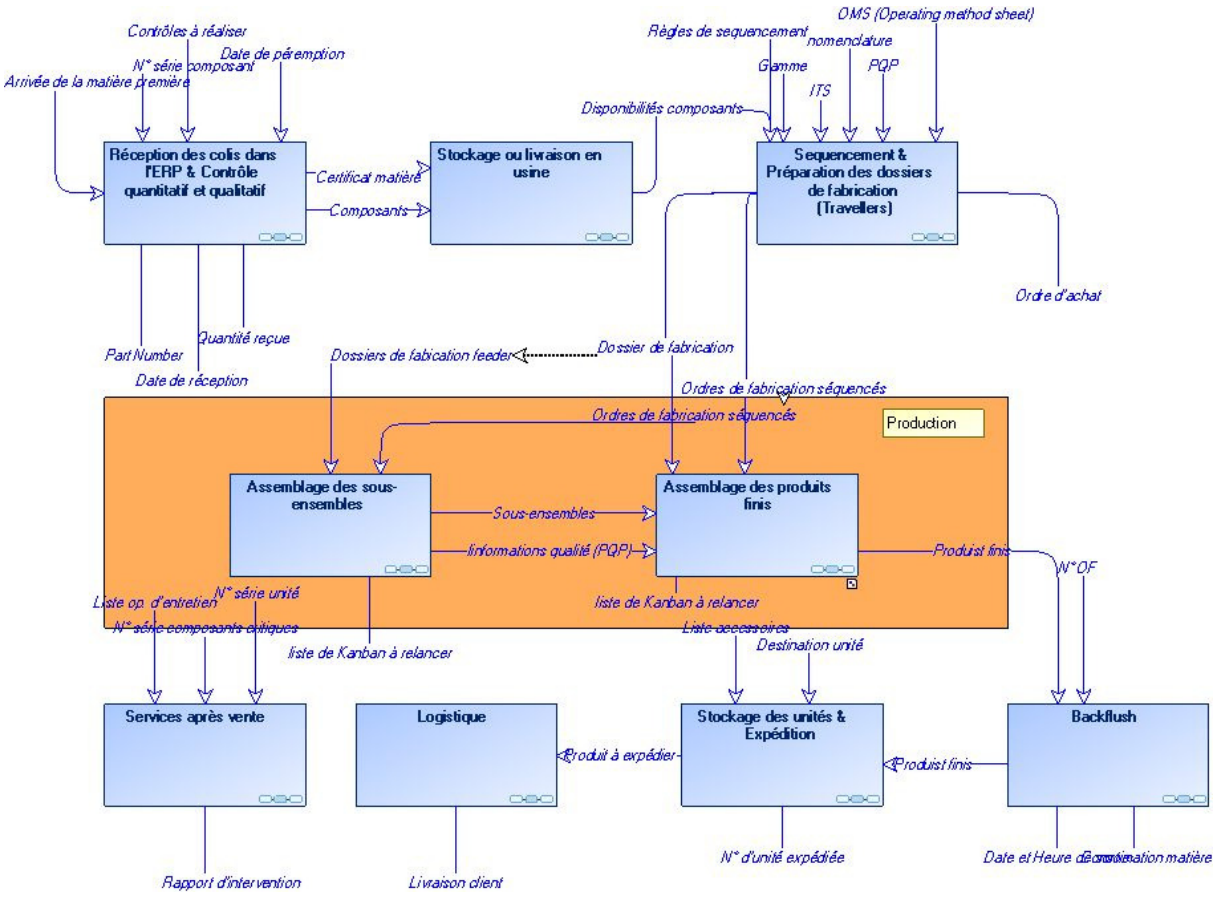


Figure 11 : L'organisation dans les usines de Charmes et Golbey

Le processus de fabrication implique essentiellement deux éléments : les sous-ensembles qui seront fabriqués sur les feeders et les produits finis. Mais pour être mis en œuvre des processus annexes sont utiles, il s'agit du suivi de la consommation matière qui se fait grâce à l'opération de « BACKFLUSH »[1] (APICS, (1997)) ensuite du stockage des unités en attente d'expédition. Et enfin, la logistique et le SAV sont assurés par d'autres centres de l'entreprise TRANE.

[1] Mise à jour de l'inventaire des composants par décomposition de la nomenclature des articles fabriqués et par le calcul des ensembles produits

Dans cette thèse nous nous intéressons essentiellement aux processus de fabrication. Ces derniers sont organisés selon la méthode DFT comme nous l'avons déjà dit et que nous expliquerons dans la section suivante.

3. ORGANISATION DE LA FABRICATION DE L'ENTREPRISE TRANE

3.1 Qu'est ce que la DFT ?

La D.F.T est une organisation de la production basée sur la philosophie et les outils du juste-à-temps. L'objectif est de réduire, voir d'éliminer les opérations sans valeur ajoutée (stockage, attente, préparation...), et de diminuer les délais et les coûts de production. Cette méthode de gestion de production est avant tout visuelle, ce qui permet d'améliorer le flux et la qualité des produits. Elle repose sur une grande flexibilité à la fois des opérateurs et des machines, rendue possible grâce à des strictes mesures et application des temps de cycle (TACKT TIME).

Pour atteindre les objectifs de flexibilité, de qualité et de la suppression des tâches à non valeur ajoutée, la méthode DFT s'appuie sur une démarche en 20 étapes. Le but étant d'organiser la production à partir de la demande client et en s'appuyant sur des paramètres calculés à partir de celle-ci et à partir de formalismes mathématiques établies pour assurer la maitrise des temps de cycle. En effet, dans le but de produire uniquement les quantités nécessaires et de ne pas créer de stocks, la DFT propose de calculer un indicateur appelé DC (Demand at Capacity). La DC est le nombre de produits à fabriquer par jour, calculé à partir des prévisions de ventes de l'année courante et sur les fluctuations de l'année. Celle-ci est révisée tous les trois mois et subit de faibles fluctuations dues à la demande effective du client. Une fois cette quantité établie, il est primordial de calculer le temps que l'on doit accorder à la fabrication de chaque unité, en respectant les exigences des clients en matière de délai et de quantité. Ce temps est appelé « TACKT TIME ».

Ainsi, le TACKT TIME est le rythme auquel on désire qu'une unité quitte le processus de fabrication de l'entreprise. Il est exprimé en unités de temps, minutes ou fractions de minute et s'obtient en divisant la durée de production maximale d'une équipe de travail par la quantité de produits que celle-ci doit fabriquer durant la période considérée (nombre d'équipe) pour satisfaire la demande des clients.

Formule 1:

$$TACKT = \frac{H \times S}{DC}$$

H : production maximale d'une équipe de travail

S : nombre d'équipe

Pour respecter ce TAKT TIME, la ligne est organisée selon une succession d'opérations calculées à partir du ACTUAL TIME (AT) le temps réellement nécessaire pour fabriquer une famille de produits de la ligne en question. Ce temps est ensuite pondéré par la demande DC (ATw). Le calcul du nombre d'opérations (OP) est déterminé de la manière suivante :

Formule 2:

(1) $$ATw = \frac{\sum (DC \times AT)}{\sum DC}$$

AT : le temps nécessaire par famille de produits

(2) $$OP = \frac{ATw}{TACKT}$$

La deuxième formule définit le nombre d'opérations de la ligne. Cependant, le temps nécessaire à chaque opération n'est pas forcément égal au TAKT TIME. Cela est du principalement à la nature des tâches et à leur ordre dans chaque opération. Ainsi, pour équilibrer la ligne, absorber les pics ou les creux de temps et obtenir donc, une production équilibrée, la DFT fait appel à la notion de « IN PROCESS KANBAN » (IPK). Un IPK est un emplacement où les unités stationnent entre deux postes d'assemblage et qui assure la synchronisation (à stock minimum) des feeders avec la ligne principale. Aucune opération de production n'y est permise. L'IPK est matérialisé au sol par une croix barrant un rectangle à la dimension de l'unité. Le nombre des IPKs, est calculé à partir de la formule suivante.

Formule 3:

$$IPK = \frac{I \times C}{TACKT}$$

Avec $I = AT - TACKT$

$$C = \frac{H}{TACKT}$$

Ce type de Kanban sert à réguler le flux : en effet lorsqu'un opérateur a terminé son travail sur son poste, il place l'unité sur laquelle il vient de travailler sur l'IPK. Si l'opération suivante ou précédente nécessite plus de temps, il devra alors « flexer » : c'est à dire aller aider soit vers le poste en amont soit celui en aval.

3.2 Une organisation de la production basée sur le système Kanban

Au niveau opérationnel, toute l'organisation de la production est basée sur le Kanban aussi bien pour l'approvisionnement du matériel que pour le déclenchement du travail. En plus des IPK, il existe trois sortes de Kanban dans l'entreprise:

- Le Kanban simple : pendant qu'un opérateur utilise le contenu d'un des deux Kanbans, l'autre est en cours d'approvisionnement (Two Bin System). La formule utilisée est la suivante :

Formule 4

$$Taille_kanban = \frac{\sum (D \times Q) R}{Hp \times P}$$

D = Daily rate (demande journalière) par poste

Q = Quantité nécessaire par produit

R = Temps de réapprovisionnement (heures)

Hp = Heures travaillées par poste

P = Quantité conditionnement fournisseur

- Le NRKB « Not-Replenishable Kanban » ou le Kanban non réapprovisionné. Ce type de Kanban est utilisé pour approvisionner du matériel spécifique à une commande. A la différence d'un Kanban classique, la consommation de ce Kanban ne conduit pas à approvisionner une nouvelle pièce identique, il sert juste à donner l'autorisation de travailler, l'objet du travail étant donné par l'OF (issu de l'ERP) le premier dans la file d'attente des travaux à réaliser sur le poste considéré. Les Not Replenishable Kanbans sont utilisés quand les pièces ou les sous-ensembles ont un niveau très élevé de personnalisation ou bien que la demande de capacité ne permet pas d'assurer un bon taux de rotation des pièces.

- Le Dual Card : on attend l'utilisation de la dernière boite de pièces avant de relancer la fabrication de la totalité de celles-ci afin de diminuer les différents réglages ou gérer des problèmes de conditionnement des pièces dans les containers.

Une fois vides, les conteneurs communiquent une demande d'approvisionnement en articles correspondant et sont pris en charge par les « RUNNERS », personnes chargées de les remplir. Les circulations des Kanbans se font pour la plupart suivant la figure 12

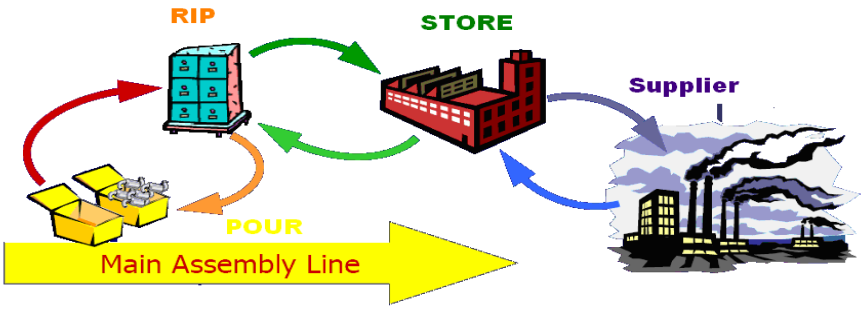


Figure 12 : Les circulations des Kanbans (PULL sequence Chain)

Les composants nécessaires à la fabrication sont stockés et placés au plus près de leur

point de consommation sur le procédé. Ces points de stockage sont appelés POUR (Point Of Use & Replenishment). On utilise aussi un stockage intermédiaire entre le magasin et ces POUR appelé RIP (Raw In Process) (voir figure 13). Celui-ci permet de diminuer le temps de réapprovisionnement (R dans la formule 4) et par conséquent le nombre des cartes Kanban à gérer. Ainsi la matière avance le long du procédé, en passant par des chaînes d'alimentation appelées feeders et des « cellules machines » sous forme d'un U.

3.3 L'implantation physique dans l'usine et la synchronisation des flux

Dans l'objectif de réduire les surfaces de production et d'améliorer la circulation des flux. La DFT entraîne une réorganisation de l'espace productif en lignes de production spécifiques, en pipelines. Nous considérerons ainsi qu'au centre de notre usine existe un flux principal de production. Pour alimenter ce flux, divers sous ensembles sont nécessaires, ces sous-ensembles sont fabriqués sur des lignes appelées « feeders » ou des cellules indépendantes.

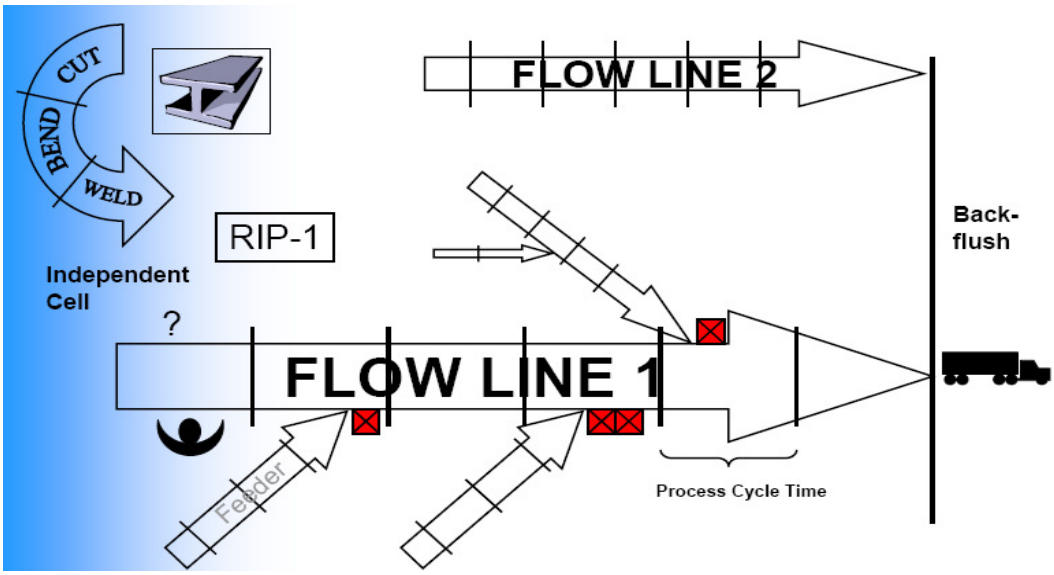


Figure 13 : implantation dans une usine DFT et la synchronisation des flux

Comme nous l'avons dit précédemment, cette technique de production nécessite une très bonne synchronisation entre les lignes et les feeders pour permettre une production synchrone. Le moindre retard ou re-séquencement peut perturber le flux. La synchronisation est assurée grâce aux IPKs (voir Figure 13) mais aussi grâce à la flexibilité de l'opérateur. Celui-ci a un rôle central dans la prise des décisions locales et dans le contrôle qualité.

3.4 Le rôle de l'opérateur

Le potentiel humain tient une place prépondérante dans la DFT car la flexibilité est nécessaire au bon fonctionnement des lignes de production. Les opérateurs sont ainsi

encouragés à acquérir de nouvelles compétences pour pouvoir travailler sur plusieurs postes.

Un des points principaux de la DFT est l'amélioration de la qualité des produits fabriqués par la méthode Total Quality Control (TQC). L'opérateur contrôle les pièces à leur arrivée et les vérifie à leur sortie du poste de travail. Pour cela, les opérateurs disposent de Method Sheets qui sont des formulaires de méthodes graphiques claires indiquant les tâches et les contrôles à effectuer. Ces instructions de fabrication sont disponibles à chaque poste.

L'aspect visuel de ce système de production est très important que ce soit au niveau des Kanbans, des IPK, des indicateurs de production et des Method Sheets. Les problèmes peuvent ainsi être décelés et résolus, localement, plus rapidement par les opérateurs.

3.5 Les principales lignes d'assemblage et feeders des deux usines : Golbey & Charmes

Comme nous l'avons mentionné au début de ce chapitre le site de Charmes produit des grands appareils de réfrigération appelés « Chiller ». Suivant le mode de condensation les produits de Charmes sont divisés en deux familles : Unité à condensation par eau et des unités de condensation par air. Ces 2 familles sont fabriquées sur deux lignes différentes (respectivement référence 5 et référence 7 dans la figure 14 qui sont alimentées par des feeders dédiés, tels le feeder batteries (référence 8) de la ligne des produits à condensation par air et le feeder Condenseurs pour l'autre ligne. Ces feeders sont les plus simples à piloter puisqu'il y a qu'un seul point de synchronisation à gérer. Les autres feeders sont des feeders communs aux deux lignes et demandent une gestion plus élaborée, notamment les feeders échangeurs (référence 1 & 4). En effet, ces derniers ont des temps de cycles de fabrication (Lead Time) très lents (en moyenne 3 j) et laissent très peu de marge pour la réaction aux aléas.

Sur le site de Golbey, TRANE fabrique trois types de produits :

- Des refroidisseurs de liquide moyenne puissance à condensation par eau matérialisé par la ligne Scroll /voyager II (référence 5 sur le plan de Golbey).
- Des refroidisseurs de liquide moyenne puissance à condensation par air matérialisés par les 2 lignes Voyager I et III (réf 9/10).
- Des ventilo-convecteurs de la ligne FAN-coil (réf 8).

La majorité des feeders sont dédiés sauf les feeders tôlerie, cuivre, et la mousse. Ces feeders doivent satisfaire les besoins de toutes les lignes de Golbey et celles de Charmes en gérant les 2 types de demandes Kanban et NRKanban, cela les rend complexes à gérer. Nous les décrivons ci-après :

Cellule tôlerie fine : (réf 1)

TRANE a initié le projet de centralisation sur le site de Golbey de l'ensemble des moyens de production tôlerie des deux usines, soit environ 25 poinçonneuses-grignoteuses et presses-plieuses. L'objectif de l'opération est d'uniformiser la matière pour orienter le pliage, gérer les flux par épaisseur pour mieux équilibrer les charges, rationaliser les en-cours en travaillant à la commande et non plus en panoplies figées. En effet, avec l'outil informatique « act/cut » d'ALMA les programmes machines sont réalisés d'une façon dynamique. Cet outil prend en entrée les différentes demandes de fabrication et après optimisation de la matière, génère le programme CNC correspondant.

Cellule Cuivre: (réf 3)

TRANE possède au sein de son usine de Golbey une section dédiée au travail des tubes cuivre. Cette section alimente les lignes de montage du site de Golbey et de Charmes, en tubes prêts à être brasés. Elle inclut des équipements destinés à réaliser le déroulage, le façonnage, le cintrage, et la coupe de ces tubes. (Les collecteurs de batterie)

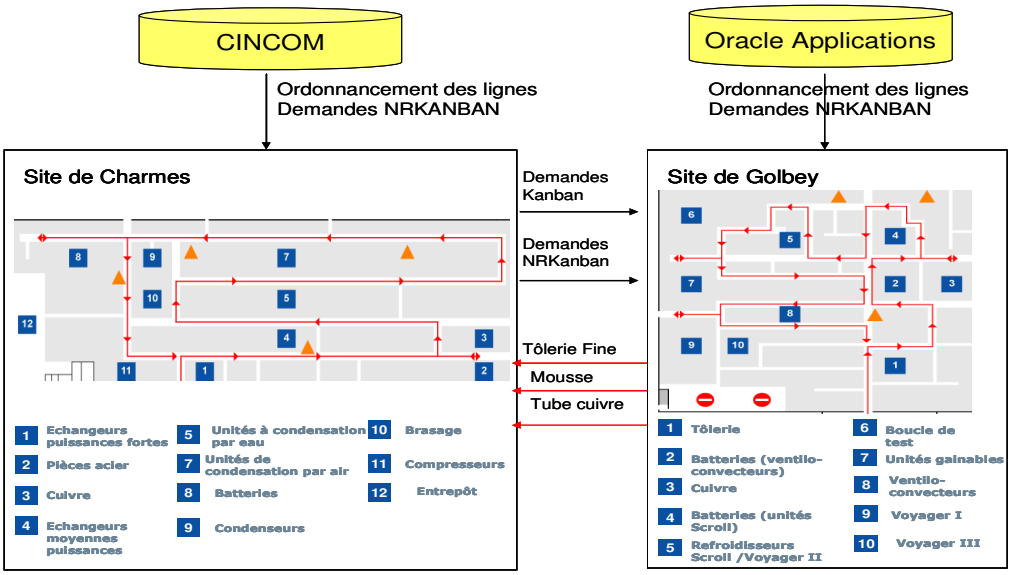


Figure 14 : Implantation des deux usines et les différents flux Info / Physique

Cellule Mousse :

L'entreprise TRANE a choisi l'année dernière d'internaliser la découpe de l'isolant (mousse) à Golbey avec un nouvel équipement implanté à Golbey (machine CNC de découpe jet d'eau très haute pression 2 têtes) piloté par logiciel « act/cut ». Cette cellule répond aux besoins de Golbey et Charmes.

3.6 *Synthèse de l'organisation selon la DFT*

La DFT est une standardisation des ressources de fabrication qui conduit à une mise en place d'une organisation de production en flux tirés. Les objectifs sont principalement la suppression des tâches à non valeur ajoutée, réduction des coûts et augmentation de la qualité et de la flexibilité. Le dimensionnement des lignes d'assemblage se fait à l'origine de la mise en place de la DFT et va de pair avec le calibrage d'un certain nombre de caractéristiques : TAKT TIME, le rythme auquel on désire qu'une unité quitte le processus de fabrication de l'entreprise, IPK (In Process Kanban) qui représente une zone de stockage associée à un signal de synchronisation.

L'opérateur joue un rôle central dans ce type de gestion. Il est le garant de la qualité produit (TQC) et surtout de la synchronisation des flux dans l'usine grâce à sa flexibilité.

Si la conception des lignes d'assemblage a atteint un niveau de standardisation intéressant, ce n'est pas le cas pour les systèmes d'information. En effet, chaque usine a ses propres systèmes d'information ce qui pose certains problèmes de synchronisation et, d'une manière plus générale, des problèmes d'interopérabilité entre les usines qui travaillent en étroite collaboration.

4. LE PILOTAGE DE LA PRODUCTION A L'ENTREPRISE TRANE

4.1 *Mode de réponse au marché*

La principale caractéristique de l'offre TRANE est la possibilité pour le client de spécifier très précisément le produit dont il a besoin. Cette liberté rend presque infinies les variantes possibles, le client a ainsi la possibilité de spécifier ses besoins au niveau de la conception du produit (fabrication à la commande).

En accord avec l'expression des besoins clients, le service marketing établit des spécifications de variantes produit complétant la nomenclature des produits standards dans une logique de différenciation retardée.

4.2 *Structure et modèle du produit*

A partir des spécifications faites par le client lors de la commande d'un produit, le « CONFIGURATEUR » (figure 15) permet de définir la nomenclature spécifique de cette référence de produit à partir des règles préétablies pour cette famille de produits. Ces informations sont rassemblées dans un modèle (structure de produit) représenté par la figure 16.

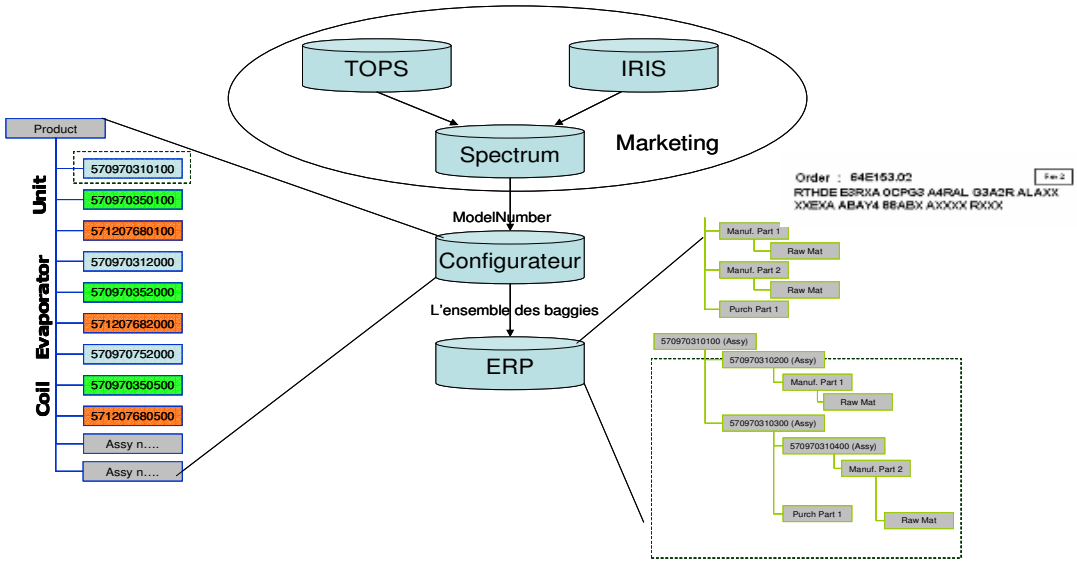


Figure 15 : Cycle de vie d'une commande client

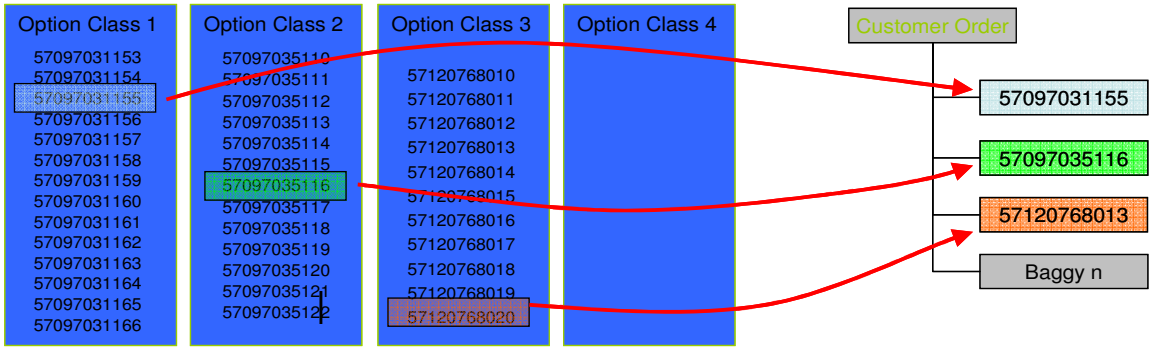


Figure 16 : Structure de produit

En effet, pour faciliter la maintenance et garantir une nomenclature la plus « plate » possible, comme celles préconisés par la DFT, TRANE a divisé chaque produit en Option Class (des rubriques découpées selon une logique fonctionnelle). A un niveau plus détaillé ; dans chaque 0ption Class, nous trouvons des « BAGGY » chacun constituant une variante de nomenclature.

Le configurateur prend en entrée le « Model Number » et en sortie, il génère la nomenclature spécifique du produit constitué d'un ou plusieurs sous-ensembles. Ensuite un numéro de commande est généré dans l'ERP. A cette commande nous rattachons la nomenclature constituée des sous-ensembles définis auparavant.

Cette structure de produit (voir figure 17) permet à la fois de définir les composants et les opérations nécessaires à la production de chaque référence. Ces éléments sont complétés par plusieurs documents, en particulier, les Operation Method Sheets « OMS », en suivant la logique MRPII.

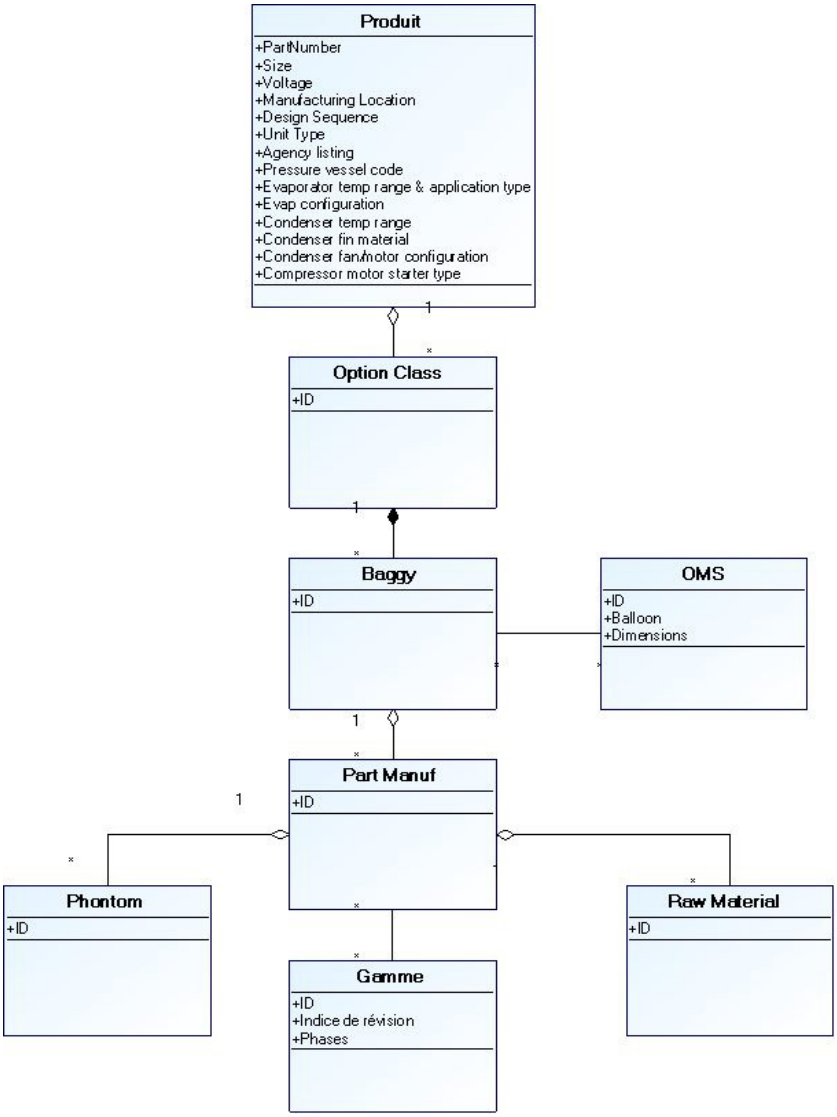


Figure 17 : Représentation de la structure produit par le formalise UML

4.3 Ordres de production

L'application de la DFT et la mise en œuvre de techniques Kanban a conduit à simplifier les nomenclatures. Ne subsistent dans ces dernières que, au niveau 0 le produit fini et au niveau 1 les sous-ensembles critiques. Par voie de conséquence, l'ERP ne générera que deux types d'ordre de production : l'ordre de fabrication qui déclenche la production d'un produit intermédiaire par exemple «évaporateur», et l'ordre d'assemblage, qui déclenche la production d'un produit fini, les autres composants sont gérés par Kanban et déclarés comme des composants fantômes dans l'ERP.

Le Tableau 1 montre les différents ordres de fabrication à réaliser en fonction des produits. Par exemple, pour un produit fini RTHD, il faut créer des ordres de fabrication pour les sous-ensembles évaporateur (EVP) et condenseur (CDS).

Ordres de fabrication	Unité	EVP.	CDS.	CHR	BAL	BT
RTHD	X	X	X			
RTWB	X	X	X			
RTUB	X	X				
RTAC / RTAD / RTXA / RTRA	X	X				
RTAA …..HR	X	X		X		X
CGAN	X				X	
CAN	X				X	
CGWN	X					
CCUN	X					

Tableau 1 : Les différents ordres à ouvrir en fonction des types d'unités :

Les dossiers de production associés aux ordres de fabrication contiennent la structure de produit: ils indiquent la nomenclature et les gammes. Ces ordres sont complétés par une fiche technique qui contient les modèles des produits, les modèles de production des références impliquées dans la production d'un produit fini et le PQP (Plan de Qualité Permanent). Cette documentation accompagne les produits tout le long des processus de fabrication.

Au niveau des feeders, ces ordres sont ordonnancés, en fonction du niveau de priorité de la commande du produit final, et de manière à synchroniser la fabrication des sous-ensembles avec la ligne principale.

4.4 Problèmes de synchronisation

4.4.1 Présentation de la grille GRAI

Pour étudier le système de pilotage et détecter ses dysfonctionnements nous nous sommes basés sur des outils issus de la modélisation des entreprises, en particulier, les outils proposés par la méthodologie GRAI.

La modélisation GRAI (Doumeingts G., 2004) (Doumeingts G., 1984) a été conçue pour réaliser la modélisation de la coordination des tâches par la grille GRAI, qui représente l'ensemble des centres de décision d'un système donné. Un centre de décision résulte du croisement d'une fonction de l'entreprise et d'un horizon/période de décision, reliés par des cadres de décisions et des flux d'information, en précisant les responsables de la décision. Le réseau GRAI (Roboam M., 1993) décrit le processus de prise de décision d'un centre de décision. Grille et réseaux GRAI outillent la vue décisionnelle au sens de GIM. Elle propose les phases suivantes :

- Modéliser l'existant (l'ordre de réalisation des modèles est important)
- Détecter les points forts, les points faibles, ainsi que les pistes de solution
- Concevoir la cible et la modéliser
- En déduire le plan d'actions.

4.4.2 *Nos motivations…*

La grille GRAI fournit une vision globale puisqu'elle place toutes les activités ou macro activités (résultat d'agrégation de plusieurs activités) dans une grille qui les classe par fonction (au sens de la méthode GRAI) et par fréquence ou horizon de réalisation. Elle met également en évidence les flux de décisions et d'informations entre les activités.

Enfin, si l'on rattache à chaque activité les Satisfactions / Difficultés / Propositions d'amélioration exprimées par les acteurs, la grille représente ainsi une vue synthétique du système étudié. L'utilisation de la grille GRAI pour prendre des décisions de changements sur le système conduit essentiellement à reconstituer la cohérence entre centres d'activités d'une même fonction (même colonne) ou entre centres d'activités de même fréquence (même ligne) en ajustant les flux d'informations et de décisions. Ces changements correspondent à des problèmes de synchronisation et de coordination des centres d'activités et font donc de la grille GRAI un outil de vision mécaniste.

4.4.3 *Modélisation de l'existant*

Notre problématique étant une problématique de synchronisation de flux d'information et de flux physique, nous avons volontairement limité le périmètre de l'étude aux fonctions principales de l'entreprise qui sont l'approvisionnement, la planification de la production, et la gestion des ressources.

La fonction « planification de la production » est déclinée en plusieurs centres de décision. Nous citons le centre de haut niveau « Annual Operating Plan » qui a pour objectif d'établir le plan annuel en fonction de la disponibilité des composants et des ressources de production sur un horizon d'un an et surtout de préparer le budget. La mise à jour de ce plan se fait chaque trois mois. Ensuite, le deuxième niveau est celui du PIC (Plan industriel et commercial) appelé « sales and operation planning » dans la grille GRAI est mis à jour chaque semaine. Il a pour but de lisser la production en fonction du volume des commandes et/ou des capacités de production. Le PDP (Programme directeur de production) est mis à jour chaque semaine (période) pour un horizon d'un mois. Il a pour objectifs d'une part, le séquencement des ordres de fabrication en fonction des règles préétablies, l'analyse des messages d'exception et correction ou information si nécessaire et, d'autre part à la maille de la journée, de valider les séquencements et de s'assurer que le lancement des dossiers de

fabrication se déroulera normalement. **Les déclencheurs de la fonction** de planification sont essentiellement les commandes clients complètes

La fonction d'approvisionnement est aussi déclinée en plusieurs centres de décisions (voir la grille GRAI). Elle a pour objectifs de :

- Engager les commandes d'achat et en assurer leur suivi avec la mise en place des actions correctives nécessaires.
- Etablir les prévisions d'achat pour les composants et les envoyer au fournisseur.
- Transférer les prévisions de vente en stock de sécurité et en commandes d'achat.
- Equilibrer l'offre et la demande
- Assurer la disponibilité des composants bord de ligne.

Les déclencheurs de cette fonction sont d'abord les besoins de MRP (analyse du stock, des demandes…), les besoins générés par les Kanbans et les demande SAV.

La fonction gestion des ressources a pour objectifs d'assurer les ressources nécessaires en personnel, avec les compétences et la formation permettant de réaliser un travail, définir le budget ressources Hommes et Machines et de lisser les charges et répartir les effectifs.

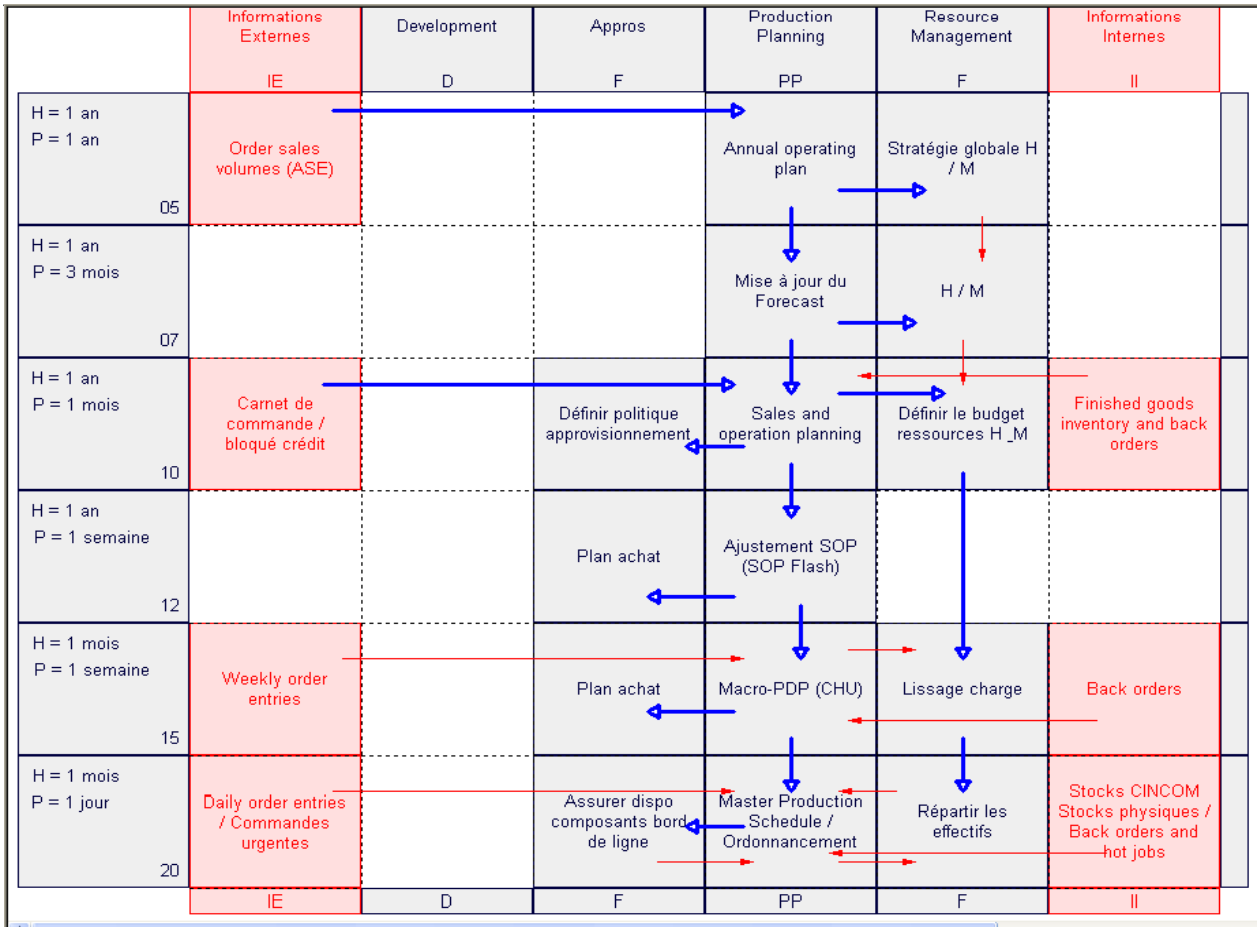


Figure 18 : Analyse GRAI

4.4.4 *Analyse*

La particularité du système décisionnel de l'entreprise TRANE est le nombre important des niveaux de décision. Cela a pour objectif de maîtriser la charge sur la ligne principale et certains feeders en désagrégeant des plans de niveaux en niveaux et en s'assurant qu'à chacun des niveaux l'équilibrage (charge de travail/capacité) sont réalisés. La disponibilité des composants en bord de ligne est assurée en 2 étapes :

- au niveau du PIC (SOP) par les prévisions d'approvisionnement annuelles envoyées au fournisseur ;
- après désagrégation, au niveau du PDP et du CBN, des ordres d'achats sont envoyés par des commandes fermes.

La dernière période de décision étant journalière, il apparaît que pour tous les problèmes de variabilité de flux vécus sur les lignes d'assemblages ou les feeders, le système centralisé ne prévoit rien. En effet, à une maille supérieure à la journée, les plans assurent, d'une part, un équilibrage de charge pour la faisabilité et, d'autre part, les ordonnancements prédictifs issus du système centralisé proposant, à cette maille, un séquencement théorique pour la synchronisation ligne/feeders. En revanche, à une maille inférieure à la journée, les outils du

JAT mis en place (Kanban, IPK et mobilité des opérateurs) assurent un ajustement de cette synchronisation face aux événements terrain. Cette décision reste très locale, sans visibilité au global, et sans possibilité d'atteindre un optimum.

4.5 Synthèse du pilotage de la production TRANE

Globalement la mise en œuvre de la production doit respecter les objectifs définis mensuellement par la planification tactique proposée par l'ERP et le logiciel d'ordonnancement. Ces objectifs sont détaillés lors de réunions hebdomadaires de Programme Directeur de Production. En conséquence, le pilotage de la production à l'entreprise TRANE est un pilotage hybride entre le MRP qui constitue le pilotage centralisé (ordonnancement de la ligne principale) et un pilotage distribué basé sur le management visuel grâce aux différents types de Kanban. Ce management visuel et local par les opérateurs a permis de donner de la flexibilité et de l'agilité au niveau terrain mais pose le problème du manque de visibilité aux décideurs pour une optimisation globale des performances de l'entreprise.

5. CONCLUSION DU CHAPITRE 1

Dans cette partie, nous avons présenté l'entreprise TRANE et l'organisation de ses usines. Dans un souci d'amélioration continue, TRANE a mis en place la méthode DFT qui impose une gestion à la demande selon les principes et les outils du juste-à-temps et impose, surtout, une standardisation stricte des procédés et des méthodes de travail.

Dans ce cadre, une des préoccupations de l'entreprise, a été de rechercher la meilleure synchronisation possible entre le flux principal des appareils de réfrigération et tous les flux d'approvisionnement des sous-ensembles (feeders). Ceci doit permettre de réduire les coûts de stockage des sous-ensembles.

En effet, le pilotage de la production vise à respecter les contraintes imposées par l'ordonnancement centralisé et prédictif de la ligne d'assemblage et une gestion de la majeure partie des sous-ensembles par un système Kanban simple. Cette méthode, basée sur la notion de renouvellement de stocks, s'applique très bien dans le cas de petites pièces à faible diversité et volume stable. Cependant, pour l'usine de Charmes qui fabrique de gros appareils de réfrigération avec des sous-ensembles de quelques mètres de long (comme les échangeurs), ces sous-ensembles ne peuvent être stockés car ils sont trop volumineux. Il faut, donc, les livrer au moment même où ils doivent être montés dans la ligne d'assemblage. Cette livraison est ce qu'on appelle dans littérature une livraison synchrone. Elle permet de n'avoir pratiquement aucun stock. Cependant, il est très difficile de garantir une bonne synchronisation entre la ligne et ses feeders. En effet, parfois pour des raisons très diverses, l'ordonnancement initial est perturbé et donc les produits arrivent sur la ligne principale dans un ordre différent de celui qui a servi à commander les sous-ensembles. D'où l'importance d'un meilleur dimensionnement des IPKs (dans le cas de la DFT) qui assurent cette synchronisation, et surtout l'importance de la visibilité dans ce mode de gestion.

D'autre part, l'inertie induite à la fois par les différents horizons et périodes des différents niveaux de décisions, et celle engendrée par le flux inverse (déclaration de production), posent le problème de synchronisation flux physiques et flux d'informations. Ce problème est accentué par l'utilisation du Kanban qui favorise une gestion en « boites noires » ne permettant aucune visibilité au niveau du système d'information. Nous avons pu mesurer l'importance de cette visibilité pour la gestion des sous-ensembles qui transitent entre les deux sites (Golbey et Charmes).

A l'issue de la description des différents modes de pilotage pratiqués à l'entreprise TRANE, les problèmes induits sont principalement liés à des problèmes de synchronisation (physique/physique ou physique/information).

Le chapitre suivant, a pour but de positionner et détailler les différentes méthodes de synchronisation de flux. Ce positionnement sera cadré par une structuration de l'état de l'art général sur le pilotage de production, ses outils, ses méthodes de synchronisation.

Ce chapitre doit, en particulier, répondre à ces différents points :

- Quelles sont les solutions que les recherches académiques ont apportées aux différents problèmes de synchronisation ?
- Est-ce que ces solutions sont suffisamment génériques pour être appliquées à tous types d'entreprises et, en particulier, à l'entreprise TRANE ?
- Quels rôles peuvent jouer les nouvelles technologies de l'information et de la communication dans la définition des nouvelles structures de pilotage ?

II Synchronisation de flux en gestion de production

1. INTRODUCTION AU CHAPITRE 2

Un système de production ne peut être conçu qu'en fonction de son environnement. En effet, son bon fonctionnement dépend de la capacité des acteurs à prendre en compte d'une part les demandes des clients et d'autre part les possibilités des fournisseurs. Il ne s'agit plus d'optimiser localement le rendement de telle ou telle opération, mais bel et bien de faire en sorte que, dans leur ensemble, les ressources soient coordonnées et synchronisées pour optimiser le résultat global, compte tenu des contraintes de l'entreprise. Ceci est d'autant plus vrai que l'entreprise doit faire face aux besoins croissants de flexibilité et de réactivité d'une part, et de personnalisation des produits (Ollero A., et al., 2002) (Nof S.Y., et al., 2006) d'autre part.

L'objectif le plus communément admis de la gestion de production consiste à établir des plans viables sur plusieurs horizons et à les mener à bien. La mise en place de ces plans diffère d'une entreprise à une autre. En effet, si un tableau géré manuellement permet d'établir des plans viables dans une petite structure, un système informatique de type MRP (Manufacturing Resources Planning) sera nécessaire dans une grande société.

La maîtrise de la production s'appuie sur deux flux majeurs : le flux matières et le flux d'informations. Il s'agira de les synchroniser. Quelle que soit la manière de faire, le système s'attache toujours à planifier d'une manière optimale l'horizon de gestion, d'une part, et à vérifier, à l'usage, que ce qui a été réalisé correspond bien à ce qui a été prévu, d'autre part. A travers cette notion de planification, il apparaît donc que le temps est un facteur clé : "le temps est la plus précieuse ressource" (Plossl W.G., 1993). La synchronisation peut être alors vue de deux façons.

Une synchronisation à travers le temps (diachronique) : évolution dans le temps de relations entre les mêmes caractéristiques (propriété d'adaptation).

Une synchronisation dans le temps (synchronique) : relations entre caractéristiques d'un système à un instant donné (propriété structurelle, propriété d'organisation,… (Morel G., 2004)(Voir la figure 19).

Le principe de synchronisation : postule que des caractéristiques soumises à des propriétés diachroniques sont à tous instants compatibles avec les propriétés synchroniques susceptibles de les lier. En effet, comme le montre la figure 19 les propriétés diachroniques

sont véhiculées par des flux d'information « reliant » les différents systèmes considérés et les propriétés synchroniques sont assurées par des flux d'information « contrôlant » les autres flux.

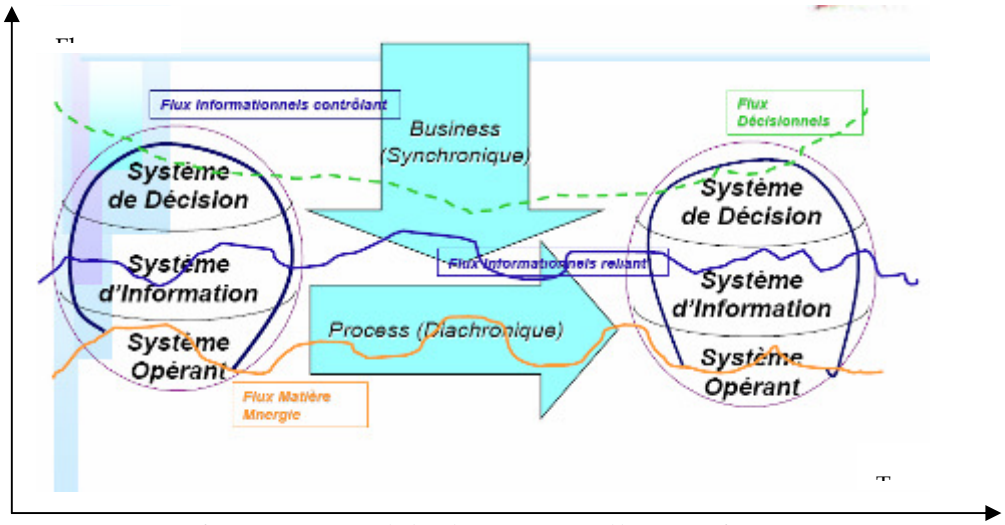


Figure 19 : Modèle du système d'entreprise

Par exemple, la synchronisation dans le temps peut être assurée par les différents plans du MRPII et à travers le temps par des mécanismes comme le stock ou les Kanbans. Néanmoins, la différence des horizons et des périodes dans la logique MRPII et le besoin accru de la réactivité, font que les plans se désynchronisent.

Pour assurer une meilleure synchronisation, les architectures de production actuelles évoluent vers une réduction du nombre des niveaux décisionnels présents dans les architectures hiérarchiques de type C.I.M. (Kosanke K., 1995). Pour autant, ce type d'architecture, même si elle s'est révélée efficace en terme de partage d'informations ne confère pas aux entreprises l'agilité suffisante prônée notamment par la communauté internationale I.M.S. (Intelligent Manufacturing System) et constitue donc un frein à la réactivité de la chaîne de décision si l'on tient compte des temps de traitement de l'information opérés à chacun des niveaux.

En parallèle de la mouvance CIM (dans les années 80) nous avons vu se développer dans les industries diverses applications des concepts du juste à temps. Les systèmes de production et de logistique ont considérablement évolués pour assurer plus de réactivité et plus de flexibilité. Ces systèmes, en plus, de leurs objectifs de flexibilité et de réduction des délais, impliquent un management participatif des opérateurs.

Aujourd'hui, de systèmes centralisés et hiérarchisés pilotant entièrement les flux physiques nous sommes passés à des modes de pilotage « hybrides » donnant aux opérateurs de terrain plus d'autonomie et plus de responsabilités (la DFT est un bon exemple). Nous avons donc migré vers des systèmes où la décision autonome et locale est

devenue possible. Ceci a permis, entre autre, de supprimer des niveaux de prise de décision dans le système centralisé, de simplifier les processus de pilotage, les nomenclatures et d'alléger les bases de données. Comme nous l'avons précisé dans le chapitre 1 l'utilisation du Kanban permet de réduire les niveaux de la nomenclature.

Par la suite, on a constaté un manque de visibilité : les décisionnaires de production et de logistique pilotaient alors des « boîtes noires » (Thomas A., et al., 2008) n'en contrôlant que les entrées et sorties. La synchronisation des flux est alors assurée par des systèmes comme le Kanban ou par des stocks et par l'opérateur de terrain ce qui ne garantit pas l'optimalité des décisions prises par celui-ci. Effectivement, les opérateurs ne prennent des décisions qu'à partir d'une vision partielle du système.

Une forme d'automatisation de ces processus de terrain est alors apparue depuis quelques années afin d'assurer de la visibilité, de la traçabilité et de fournir une certaine aide à la décision locale, voire des propositions d'optima.

Le concept de Systèmes Contrôlés par le Produit (SCP) fait partie de ces principes d'automatisation. Il s'appuie sur une interprétation du paradigme « Holonic Manufacturing Systems » (Valckenaers P., 2001) pour expérimenter l'intérêt de rendre le produit et, au-delà l'ensemble du procédé, interactif afin d'organiser de façon plus collaborative l'interopérationnalité des différents systèmes hétérogènes de pilotage et de gestion (APS, ERP, MES, SCM) composant la chaîne de production et de logistique des entreprises (Baïna S. and Morel G., 2006).

Cette interprétation tire parti des progrès et de la miniaturisation croissante des technologies infotroniques (RFID, communications sans-fils, etc.) et mécatroniques (composants logiciels embarqués) pour faire de ce produit actif un objet composite assurant une relation récursive logiciel-matériel entre les services et les biens associés aux produits en reliant tout objet logique de contrôle ou de gestion à au moins un objet physique du procédé.

Le paradigme SCP, qui a conceptuellement guidé l'ensemble des travaux cités (Gouyon D., 2004.), est une alternative pragmatique pour permettre aux entreprises de migrer d'une organisation intégrée vers une organisation adaptable puisque l'originalité de cette approche est de combiner des décisions centralisées prises a priori sur des horizons à moyen, voire à long terme, avec des décisions décentralisées prises « en exécution » sur des horizons à court terme, voire sur événements.

Ce chapitre a pour vocation de décrire les différentes structures de pilotage et mettre en évidence les problèmes de synchronisation, ainsi que l'apport du SCP pour résoudre ces problèmes. Dans la première partie de ce chapitre, nous avons jugé nécessaire de présenter les différents flux qui circulent dans l'entreprise. La deuxième partie associé le pilotage de

flux à deux modes de synchronisation. Après une synthèse des problèmes des différents modes de synchronisation, nous expliquerons le rôle que pourra jouer un pilotage hybride, centré produit, dans la résolution de ces problèmes.

2. LES FLUX DANS LA GESTION DE LA PRODUCTION

La fonction « gestion de production » se décompose en niveaux hiérarchiques de différentes granularités et correspondants à diverses échelles temporelles en fonction de critères temporels. En effet, Dès 1965, Anthony distingue la « planification stratégique », le « contrôle de gestion » et le « contrôle opérationnel » (Anthony R.N., 1965) comme trois catégories de décisions de gestion habituellement rencontrées dans les organisations. Dans la gestion de la chaîne logistique, ces niveaux de gestion sont déclinés selon les termes «stratégique», «tactique» et «opérationnel» ayant des finalités différentes (figure 20).

La planification est une réflexion à long et moyen terme orientant le gestionnaire vers des stratégies de production privilégiant par exemple les valeurs de stock, le lissage de charge ou les ressources financières nécessaires (Lamouri S., 2006). Le pilotage a une visée opérationnelle. Il s'agit de commander le système physique à court terme. Synchroniser les flux, cela consiste à piloter le flux matière grâce à un flux d'informations.

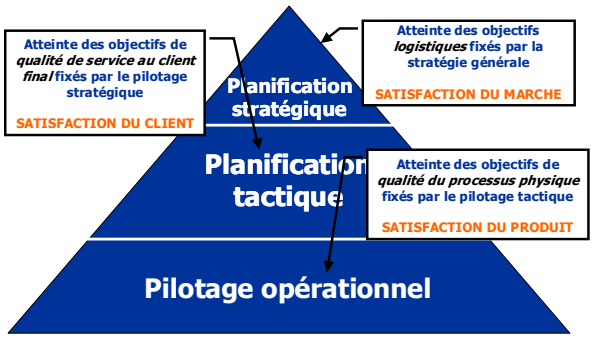


Figure 20 : Les trois niveaux de planification

Le flux matière a toujours été à la base de la gestion de la production. Il est visible, lent et onéreux. Visible du magasin matière à la zone d'expédition, lent parce que sa mobilité dépend non seulement des temps de transformation, mais aussi des temps de transfert et d'attente. Les temps de transformation peuvent ne représenter que 5 à 20 % des temps de transit globaux, dans les entreprises manufacturières (le résultat d'une enquête du CETIM (Centre d'Etudes des Techniques des Industries de la Mécanique), repris dans de nombreux ouvrages, reste, toujours d'actualité dans les entreprises qui n'ont pas parfaitement intégré le concept de production en juste à temps.

Le flux d'informations, lui, est invisible, rapide et peu onéreux. Les informations peuvent être verbales, informatiques, enregistrées, écrites... Elles sont dans tous les cas beaucoup plus souvent invisibles. Exceptions faites de celles que l'on trouve dans les entreprises qui depuis quelques années ont choisi un "management visuel" (Thomas A., 2004). Les coûts relatifs à ce flux sont liés à la gestion informatique essentiellement. Mais toute l'information et toute la communication ne nécessitent pas évidement l'utilisation de systèmes informatiques.

Les aspects financiers quant à eux intéressent aussi le gestionnaire pour évaluer ses scénarios et prises de décisions. D'une manière générale le flux financier concerne essentiellement le directeur financier et la direction de l'entreprise.

La difficulté de la synchronisation tient à l'existence de deux objectifs antagonistes :

- Minimiser la charge financière du stock.
- Améliorer le service de la demande, qu'il s'agisse d'une demande commerciale (stock de produits finis) ou d'une demande de l'atelier (stock de matières première), l'objectif est d'assurer le meilleur taux de service possible.

Pour atteindre ces objectifs deux choix sont possibles:

- Dans un cas la décision est prise en fonction des consommations passées, c'est-à-dire du stock restant. La méthode à point de commande, le recomplétement périodique, le Kanban et dans une moindre mesure la méthode des flux synchrones se situent dans ce cas de figure. Toutes ces méthodes reposent sur l'hypothèse d'une consommation future régulière sur un horizon au moins égal à la durée d'écoulement des quantités commandées. Dans ce cas, l'essentiel des décisions est pris de façon distribuée à même le flux.
- Dans l'autre cas, la décision est prise en fonction des consommations futures. La méthode MRP appartient à ce type de catégorie. L'irrégularité des consommations oblige à prendre en compte de façon précise les sorties futures. Ces méthodes sont généralement prédictives et font partie des approches dites centralisées.

3. LA SYNCHRONISATION DES FLUX DANS UNE APPROCHE CENTRALISEE

3.1 De la régulation au pilotage

L'essentiel des systèmes de pilotage centralisés sont de structure MRPII (Manufacturing Resources Planning) (Vollmann T.E., et al., 1997). Comme nous l'avons vu, cette structure propose un modèle de décision sur 5 niveaux qui sont: plan stratégique, plan industriel et

commercial, programme directeur de production, planification des besoins en composants (MRP en Anglais) et pilotage d'atelier.

Les systèmes MRP 2 sont donc des systèmes dont l'organisation des fonctions et des décisions est hiérarchique. Hiérarchiser les fonctions et les décisions consiste à concevoir un modèle en plusieurs plans, chaque plan étant le lieu d'un ensemble de décisions d'échelle et d'horizon spécifiques. Pour chacun de ces niveaux, on identifie un objectif, un horizon et un niveau de détail, et chaque plan obtenu est revu avec une périodicité spécifique. Par itération on réalise l'adéquation entre la charge induite par le plan à capacité infinie et les capacités des contraintes du système afin d'obtenir un plan réalisable. Ce plan est ensuite désagrégé au niveau inférieur de détails (voir la figure 21).

Ce mode de fonctionnement et de désagrégation des plans induit une certaine inertie beaucoup critiquée aujourd'hui face aux objectifs de réactivité (Génin P., et al., 2005).

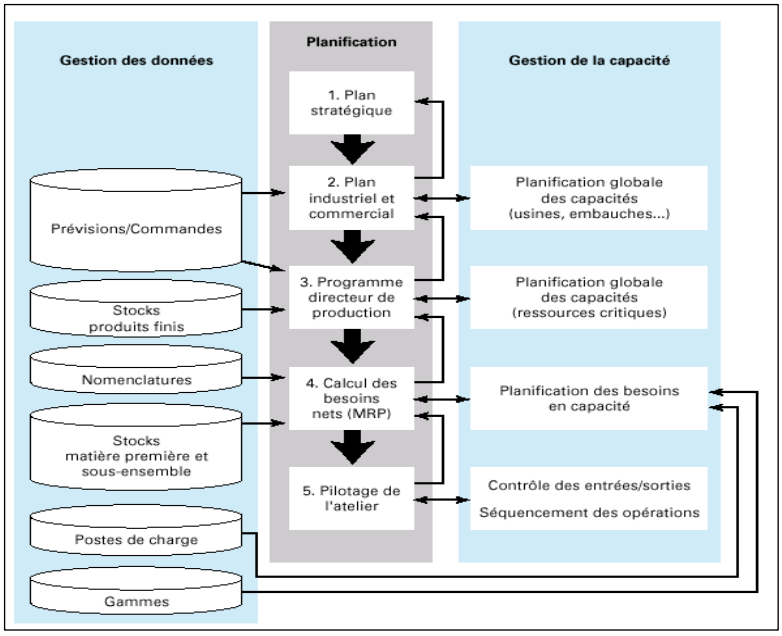


Figure 21 : Les niveaux de planification dans MRP 2 (Thomas A., 2004)

En effet, la figure 22 présente l'exemple de désynchronisation temporelle du PDP avec l'ordonnancement, mais le même raisonnement peut être tenu entre le PDP et le PIC.

Par exemple, si une nouvelle commande est enregistrée dès le début de la période p1. Sa prise en compte ne sera traitée qu'au prochain établissement du PDP et du calcul des besoins, en fin de semaine p1 pour être descendu dans l'atelier qu'en début de période p2. Ainsi les plans se désynchronisent. (On retrouve ici le problème de périodicité et de périodes gelées mis en évidence dans le chapitre 1 pour le cas TRANE)

Ce problème de réactivité est en partie résolu grâce à l'intégration des centres de décision dans les APS.

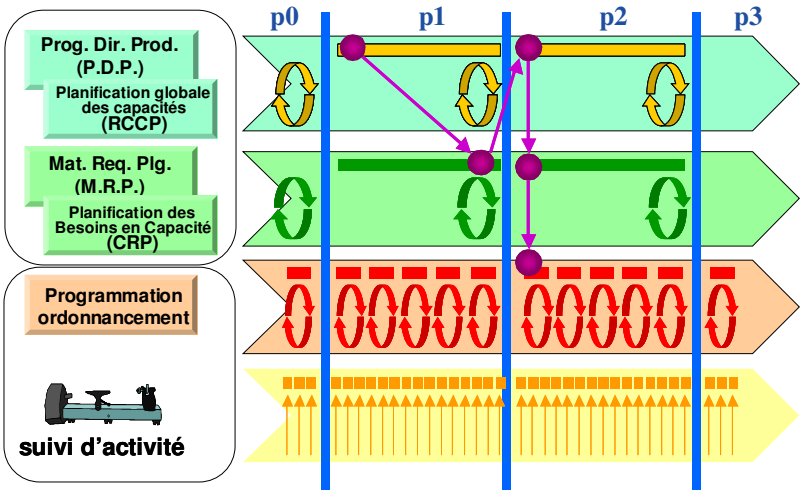


Figure 22 : Désynchronisation des plans MRP 2, exemple du PDP et de l'ordonnancement (Génin P., et al., 2005)

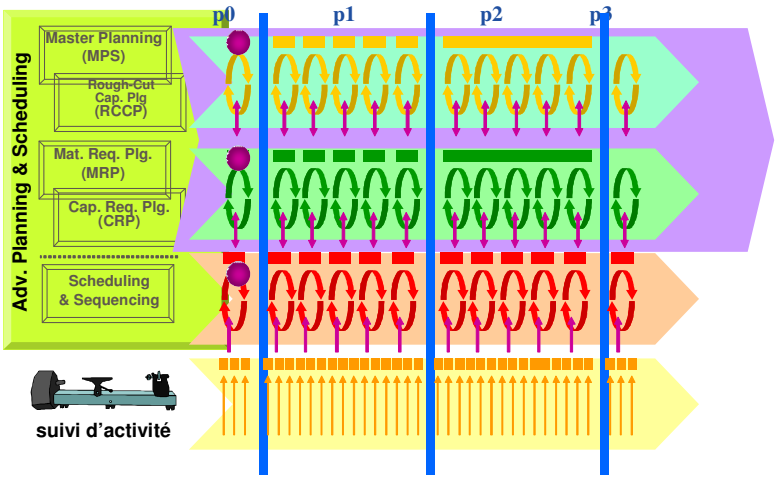
3.2 De la gestion à l'optimisation de la production

Les APS, ou systèmes de planification avancée (Advanced Planning System) sont apparus ces dernières années pour pallier certaines limites des systèmes MRP2. Ce sont des progiciels qui optimisent la planification et synchronisent les flux de la chaîne logistique en tenant compte simultanément d'un grand nombre de contraintes. (Génin P., et al, 2005). Ils s'appuient sur les nouvelles puissances des systèmes informatiques et réseaux et sur les capacités des solveurs actuels pour calculer de manière centralisée l'ensemble des plans d'une chaîne logistique. Cette centralisation des données permet d'accélérer la propagation des contraintes entre les différents plans. Tout ceci permet d'assurer la cohérence des plans entre les maillons de la chaîne logistique, mais aussi, d'accélérer les flux d'informations verticaux (réduction de l'inertie induite par un système MRPII classique).

Ainsi, si un plan s'avère remis en question en un point de la chaîne logistique, il sera possible de générer des plans réalisables en propageant le calcul fait à un niveau aux niveaux inférieurs en un même calcul (voir figure 23). Nous pouvons, donc, considérer les APS comme une tentative, par voie centralisée, d'avoir de la réactivité.

Cela pose néanmoins le problème de l'hyper-sensibilité des décisions globales aux événements de terrain. Connu sous le terme de nervosité, ce phénomène conduit à des changements incessants des plans tactiques. Il est toutefois possible d'atténuer cette nervosité, en agissant au niveau du PIC (Génin P., 2003) ainsi que lors de la désagrégation du PIC en PDP (Ortiz-Araya V., 2005). Pour obtenir des plans robustes (et donc atténuer la nervosité des plans), ces travaux se sont essentiellement concentrés sur la variabilité des

demandes clients et ne prennent pas en compte les aléas ou événements terrain. Un des mécanismes permettant d'absorber ces perturbations (désynchronisation) est le stock.



3.3 *Le rôle des stocks dans la synchronisation des flux physiques*

Pour analyser la flexibilité introduite par la présence des stocks et comprendre leur rôle en tant qu'outil de synchronisation il convient de se placer du point de vue des flux matières. Dans la figure 24, le point de stock permet de mettre en action de façon synchronisée deux boucles logistiques de fréquences de rotation différentes (ex v1 une pièce à l'heure et v2 x pièces au mois). Le stock agit comme « un réducteur de vitesse » et découpe une boucle logistique unique modélisant la réponse du système industriel à la sollicitation client, en deux boucles de fréquences de rotation différentes adaptées aux contraintes du système en question.

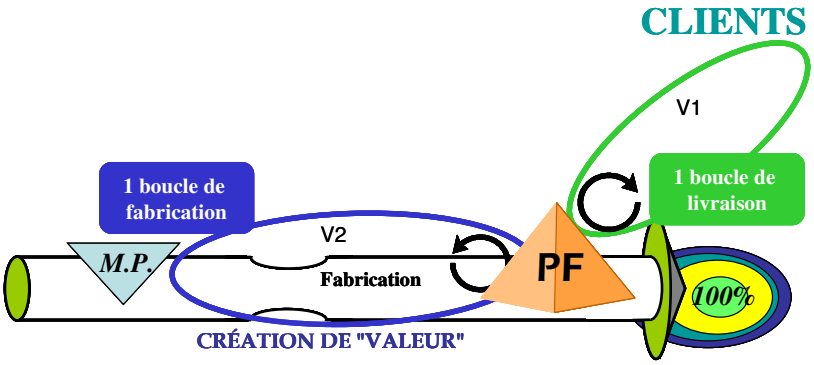


Figure 24 : La fonction de découplage du stock (Thomas A., 2007)

Dans ce cadre, le problème se situe dans le dimensionnement des stocks. Quelle est la quantité minimale pour, d'une part, permettre la synchronisation des flux et la flexibilité au niveau postes de travail et d'autre part, minimiser les coûts financiers dus à l'immobilisation des flux matière ?

4. LA SYNCHRONISATION DES FLUX DANS UNE APPROCHE DISTRIBUEE

Au niveau opérationnel, et pour relier les flux à travers le temps, la synchronisation est assurée par plusieurs mécanismes et outils issus des méthodes de juste à temps comme le Kanban ou l'approche synchrone que nous expliquerons par la suite. Cependant, l'aspect de distribution dans l'approche synchrone peut être vu de deux façons. Une distribution au niveau des outils d'optimisation (un optimisateur global et des optimisateurs locaux pour chaque feeder) (Muhl E., 2002) ou une distribution au niveau terrain grâce à la notion d'IPK que nous avons expliqué dans le contexte industriel.

4.1 Kanban

Kanban signifie étiquette en japonais. Le système Kanban a été développé par Toyota dans les années 50 (Ohno T., 1988). Il prône l'élimination de tous les gaspillages quels qu'ils soient. Dans cette approche, le Kanban est le système qui permet de piloter les flux physiques par la consommation aval. Il se met en œuvre par des cartes et des tableaux visuels, qui permettent aux personnes de terrain, de gérer eux mêmes les flux. Cependant, il fonctionne avec des règles claires, définies et suivies par une personne nommément responsable qui a pour souci d'optimiser le stock et de synchroniser les « intrants » et « sortants » de son poste.

Dans le système Kanban, c'est le client qui impose le rythme. Ce rythme est donné à l'opération la plus en aval, qui elle-même, par le jeu des boucles Kanban, le transmet aux opérations amont et ce, lorsque cela est possible, jusqu'au fournisseur. C'est l'objet même de la synchronisation, qu'il s'agisse de synchroniser deux postes de travail ou deux lignes de production utilisant la même ressource.

Le Kanban peut alors être considéré comme une technique manuelle de gestion distribuée. Cela tient du fait que le flux d'information et le flux physique ne font qu'un dans ce mode de gestion (dans la mesure où l'on considère que l'étiquette et pièces sont indissociables). Toutefois, le domaine d'application du Kanban est limité aux productions stables, répétitives et de faibles volumes. Une autre lacune de cette méthode résulte de l'impossibilité d'intégrer les données liées au produit au système d'information. Ce qui conduit à une désynchronisation entre la réalité dans l'usine et l'image de cette réalité dans le système d'information de l'entreprise.

4.2 Les flux synchrones

Les flux synchrones trouvent leur origine dans la complexité croissante des produits fabriqués et livrés par les sous-traitants automobiles aux constructeurs. La diversité des

composants, le nombre important d'options et de variantes rendent désormais impossible le stockage de ces produits aux pieds des lignes de montage. Le flux synchrone se propose, donc, de livrer les produits finis des équipementiers (fournisseur externe) ou les produits semi-finis d'un atelier amont (fournisseur interne), dans l'ordre dans lequel ils vont être montés. Certains produits sont même directement fabriqués dans l'ordre du montage.

Cependant, ce type de pilotage est très sensible aux perturbations. En effet, l'ordonnancement initial peut être perturbé et donc les produits arrivent sur la ligne principale dans un ordre différent de celui qui a servi à commander les sous-ensembles. Dans ce cas, le manque de visibilité au niveau système d'information et les contraintes de temps font que la réactivité est limitée. Cette sensibilité aux aléas a été étudiée dans de nombreux travaux qui avaient pour objectif d'en diminuer l'impact afin d'assurer au mieux le respect des contraintes industrielles. Ces travaux s'orientent autour de deux axes principaux. (Joly A., 2005) :

- **La robustesse :** recherche de l'ordonnancement le moins sensible aux perturbations du process de fabrication. Il s'agit de trouver les meilleures méthodes d'optimisation pour améliorer la construction du programme de fabrication.

- **La réactivité aux aléas :** assurer le respect de la séquence prévisionnelle durant l'exécution de la production. A partir de l'étude terrain et les analyses statistiques, la modélisation des perturbations est facilitée et peut être intégrée dans des outils de simulation.

Ces études sont réalisées pour des systèmes principalement centralisés. En effet, la majorité de ces travaux ont été réalisé dans le secteur automobile. Nous citerons les travaux de (Muhl E., 2002), (Villeminot A., 2004) (Frein Y. and Castelin E., 2001). La synchronisation des flux passe par une référence unique appelée Liste Unique Ordonnancée « LUO ». Se pose, alors, deux familles de problèmes distincts liées à l'ordonnancement des véhicules.

- **Le séquencement :** la constitution de la LUO est un problème statique de séquencement des ordres fermes de fabrication. Cette approche a été initiée par Toyota (Monden Y., 1983). Elle cherche à respecter les contraintes de l'atelier montage tout en lissant la consommation des pièces.

- **Le cadencement :** c'est un problème dynamique conférant au système une meilleure réactivité.

Dans ce cadre une fonction d'évaluation a été proposée (Muhl E., 2002).Cette fonction traduit aussi bien la prise en compte des contraintes locales que la satisfaction globale (respect de la LUO) (voir figure 25)

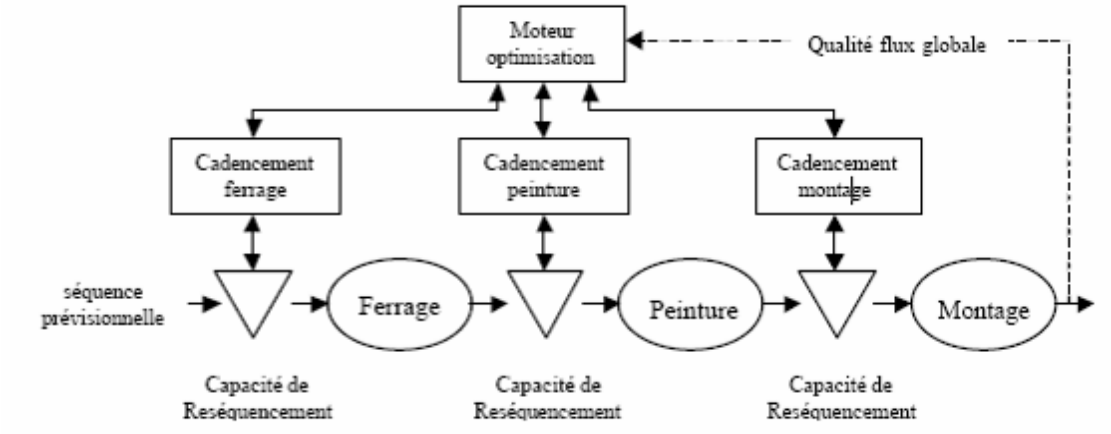


Figure 25 : Principe d'optimisation globale des flux véhicules (Muhl E., 2002)

Une des difficultés réside dans le poids à accorder à ces différentes contributions afin d'optimiser globalement l'ensemble du flux de véhicules dans l'usine. L'objet du moteur d'optimisation est de trouver le meilleur vecteur de pondération possible pour une amélioration globale des flux. Pour ce faire différentes méta-heuristiques ont été implémentées et comparées. Elles ont pour objectif de générer des pondérations les plus adaptées possibles, dont l'effet est ensuite évalué par le biais de simulations. Divers auteurs dont Caux (Caux C., 2006) nomme le couplage optimisation-simulation par optimisation via la simulation. Dans cette technique, le module d'optimisation propose itérativement des solutions de plus en plus performantes au module de simulation. Puis celui-ci évalue le comportement du système ainsi paramétré, ceci jusqu'à la satisfaction d'un critère d'arrêt (nombre de générations, valeur de l'optimum atteint,…). Plusieurs travaux récents ont montré l'intérêt d'une telle approche (Pierreval H., et al, 2002) en utilisant des algorithmes évolutionnistes pour la partie optimisation et un environnement de simulation distribué pour plus de performances. Cependant, ces optimisateurs sont réalisés hors ligne et ne permettent pas une réactivité temps réel face aux aléas.

Une autre réponse au problème de la réactivité dans une approche distribuée est proposée par la DFT. En particulier, le mécanisme IPK qui permet de réguler la fabrication des composants en fonction de la ligne d'assemblage et permet, donc, de réduire voire d'éliminer l'impact des aléas. Cependant, les décisions prises à ce niveau ne garantissent pas l'optimalité globale.

En résumé, ces pratiques industrielles (Kanban, approche synchrone) souffrent essentiellement de limites causées, en partie, par l'impossibilité d'intégrer les données liées au produit (données temps réel) au système d'information. Ces systèmes sont

anthropocentriques, dans la mesure où ils sont basés sur un pouvoir de décision et d'autonomie conféré aux opérateurs, ils posent ainsi le problème des informations nécessaires à la prise de décisions sur terrain. Le manque de visibilité des acteurs du terrain est d'autant plus dommageable qu'il va à l'encontre des exigences croissantes de traçabilité des produits et plus généralement de suivi, au plus près, de la production. Les évolutions récentes des techniques, qui remettent en cause ces limites, conduisent à proposer de nouvelles approches de pilotage.

4.3 L'utilisation des techniques de l'intelligence artificielle

Les théoriciens de l'Intelligence Artificielle (IA) (Langton C., 1989) (Minsky M., 1985), prétendent depuis les années 1950 qu'il est envisageable de créer des processus machine comparables à ceux mise en œuvre par l'intelligence humaine, ceci en vue de résoudre des problèmes complexes. « L'intelligence » peut être considérée comme la faculté de réagir à toute situation inédite en s'appuyant à la fois sur des capacités d'analyse et des connaissances, le tout issu ou non de l'expérience.

Dans l'approche distribuée, l'utilisation de techniques d'intelligence artificielle permet de pallier aux limites des différentes pratiques industrielles basées sur le management visuel précédemment citées, en garantissant une meilleure adaptabilité et réactivité aux aléas et aux incertitudes dans la mesure où on a pu les imaginer et ainsi placer des capteurs/senseurs en bonne situation. Les propriétés du modèle de pilotage global émergent donc d'un ensemble de comportements simples issus du terrain.

Pour l'exemple, Bussmann (Bussmann, S. and Schild, K., 2001) a appliqué le concept d'émergence pour concevoir un système de pilotage distribué à base d'agents dans un atelier flexible de fabrication mécanique. Des agents, correspondant aux produits, mettent des tâches de fabrication aux enchères. Les agents ressources proposent des solutions d'acceptation en fonction de critères de disponibilité et de faisabilité technique. Lorsque le produit sélectionne la meilleure enchère, il s'inscrit donc dans la file d'attente la plus petite et ainsi conduit à faire apparaître les goulots le plus tard possible, d'une part, et, si la file d'attente devant le goulot existe déjà, à asservir la charge des machines non-goulots à la charge du goulot, d'autre part. On observe donc une auto-organisation de l'atelier à partir d'une somme de comportements simples des produits. Ce concept peut être illustré par la phrase « le tout est plus que la simple somme des parties » (Morin E., 1977).

Cependant, le mécanisme d'émergence essentiellement réactif conduit à des décisions qui ne sont pas globalement optimales dans la mesure où seules les conséquences immédiates dans le temps ou l'espace sont prises en compte. Il est ainsi difficile de prouver que va émerger un comportement global cohérent et stable. Cela pose donc le problème de la validation de la pertinence de tels systèmes avant leur mise en œuvre.

Ce problème rend donc l'approche distribuée relativement inadaptée aux décisions ayant un impact à moyen ou long terme. Si cette critique est fondée dans de nombreux cas, elle est infirmée par des développements récents, visant à augmenter la proactivité de la prise de décision décentralisée en se basant sur des outils de simulation. C'est par exemple le cas de l'approche par colonies de fourmis (Valckenaers P., et al., 2006). L'analyse du comportement des colonies de fourmis sert de base au choix des décisions à prendre dans le système de production. En effet, il est possible de mesurer dans le modèle de simulation, un certain nombre d'indicateurs reflétant les performances du système en fonction des routes choisies majoritairement par les fourmis. Chaque fourmi représentant une alternative possible de routage d'une pièce dans le système. Par ailleurs, les travaux effectués par (Cardin O., 2007) montrent l'apport de la simulation en ligne (proactive) dans l'aide à la décision pour le pilotage d'un système flexible de production. Cette étude avait deux objectifs : évaluer et démontrer l'intérêt de l'initialisation du simulateur à l'état actuel du système, puis définir les éléments nécessaires à cette initialisation. La solution proposée faisait appel au concept de l'observation par simulation et des technologies d'auto-identification comme les RFID.

Grâce à ces technologies le produit devient un élément actif participant aux décisions le concernant. C'est le postulat de l'équipe « SCP » du CRAN (Baina S., 2006) (Gouyon D., 2004.) (Pannequin R., 2007), qui a choisi de faire du produit « l'interacteur » du système d'information de l'entreprise. Une communauté de recherche s'est développée autour de ces considérations. Ainsi, au plan national, un groupe de travail SCP s'est créé dans le but d'animer une action transversale aux groupes de travail du GDR MACS d'une durée limitée et de façon exploratoire, afin de permettre de recenser et échanger autour des travaux de ce domaine et surtout d'identifier les verrous et les challenges scientifiques. Ce projet a été appuyé par le Comité d'Experts Productique du CNRS qui dans son rapport de prospective daté du 15 Janvier 2007, fait état de « *la difficulté à faire interopérer des objets de nature différente en explorant les possibilités d'homogénéiser leurs capacités respectives d'interactions tout en maîtrisant l'émergence des propriétés issues de ces interactions multiples. Un premier défi scientifique est ici de rendre interactif le comportement du procédé, et particulièrement du produit, en tirant parti des progrès des technologies infotroniques (RFID, communication sans fil, …) pour le pilotage (ordonnancement et commande) en exécution (« on the fly ») d'un système de production. Ce paradigme holonique du contrôle par le produit pour synchroniser logiquement les comportements du procédé et du pilotage en regard d'objectifs variants assignés au système ouvre des perspectives intéressantes d'intégration de micro et nano technologies (réseaux de capteurs, « smart technology » , etc) afin de rendre le produit actif dans la boucle cybernétique, ainsi que d'intégration de systèmes multi-agents pour rendre l'architecture de pilotage plus hiérarchique* ».

Dans le paragraphe suivant nous expliquons la nécessité d'un pilotage hybride centré produit. Par la suite, nous présenterons les différentes méthodes qui peuvent être utilisées

pour réaliser cette hybridation (pilotage centralisé et distribué). Nous expliquerons en particulier l'apport du SCP et les technologies d'Auto-Identification dans ce cadre.

5. VERS UN PILOTAGE HYBRIDE CENTRE PRODUIT

5.1 Nécessité d'un pilotage hybride

Les recherches académiques et quelques pratiques industrielles ont montré, à ce jour, tout l'intérêt d'un pilotage hybride alliant un système centralisé à une autre distribué. Ce type de pilotage permet de tirer profit, d'une part de la robustesse et de la stabilité des premiers et, d'autre part, de la réactivité et de l'adaptabilité des seconds. La réalisation de tels systèmes de pilotage a été l'objectif de la communauté HMS (Holonic Manufacturing Systems) (Valckenaers P., 2001) depuis une dizaine d'années.

En effet, l'approche centralisée, de par sa capacité à gérer globalement le système, et à programmer les activités futures, permet de remplir un ensemble de fonctions que l'on peut désigner comme la gestion de la chaîne logistique. Celle-ci constitue l'ensemble des activités de planification et de mise en œuvre, permettant de coordonner les activités de chaque acteur de la chaîne logistique. Ces activités incluent l'approvisionnement, la production, la distribution, la vente. Les systèmes MRP2, très répandus et matures, y sont d'ailleurs très largement employés, puisqu'ils sont intégrés dans la plupart des ERP. A ce jour ils semblent pouvoir être les seuls à pouvoir prendre en compte la complexité de la chaîne logistique, en particulier la planification à long terme des activités rendue nécessaire par les délais importants de transferts de matière et d'approvisionnement.

Par ailleurs, l'approche distribuée, de par ses capacités de réactivité et d'adaptation à des conditions changeantes, correspond aux besoins du domaine de l'exécution de la production. L'exécution (ou pilotage) de la production, est l'ensemble des activités de coordination des équipements industriels, des matières, de l'énergie et des ressources humaines, afin de convertir les matières premières en produits finis.

L'appellation MES regroupe l'ensemble des outils assurant une partie ou la totalité des 11 fonctions d'exécution défini par le MESA et reprises dans la norme (ISO/IEC62264, 2004) (Voir la figure 26).

Il s'agit des fonctions suivantes

- Allocation et contrôle des ressources (resource allocation and control)
- Répartition de la production (dispatching production)
- Acquisition et collecte de données (data collection and acquisition)
- Gestion de la qualité (quality management)
- Gestion du procédé (process management)

- Planification et suivi de la production (production planning and tracking)
- Analyse de performances (performance analysis)
- Opérations et ordonnancement détaillé (operations and detailed scheduling)
- Contrôle des documents (document control)
- Gestion de la main d'œuvre (labour management)
- Gestion de la maintenance (maintenance management)

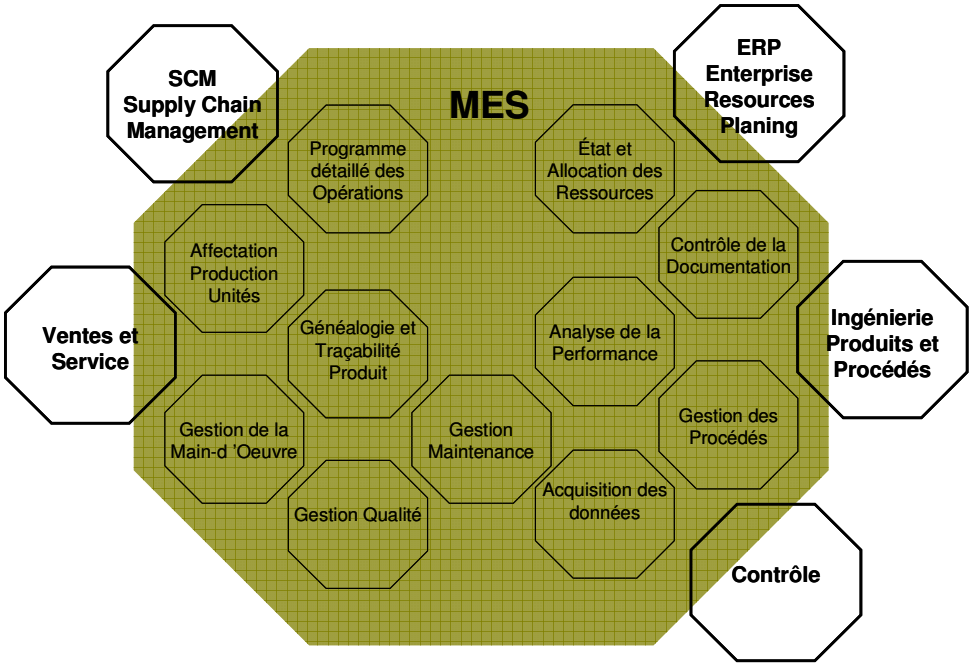


Figure 26 : Les fonctions d'un MES

Un système de production pourrait donc idéalement utiliser ces deux approches, centralisées et distribuées, de prise de décision. Celles-ci, grâce à un système assurant un couplage et un bon équilibre, conjugueraient leurs avantages. Toutefois, comme le notent (Bongaerts L., et al., 2000). Trouver le bon équilibre entre les fonctions centralisées et distribuées n'est pas trivial. Plusieurs approches d'hybridation peuvent être proposées (Pannequin R., 2007).

C'est dans ce cadre qu'une tentative de développer un MES basé sur le système HMS - Holonic Manufacturing Systems (que nous expliquerons par la suite)- a été réalisé dans les travaux de thèse de Pascal Blanc (Blanc P., 2006). L'utilisation de la structure « HOLONIQUE » (basée sur l'architecture PROSA) a permis la construction d'un pilotage évolutif et réactif, tout en autorisant de considérer des aspects globaux dans le système de production. Illustré par l'utilisation d'un cas industriel de production de vitres de sécurité feuilletées, le système développé a apporté des solutions au problème d'ordonnancement/optimisation dans le cas de la découpe de matière première. Cependant,

cette solution n'a pas été mise en place dans l'usine mais validée par un modèle d'émulation. La section suivante présente ce mode d'hybridation.

5.2 *Hybridation par la notion de «Holon »*

Le concept de Holon a été introduit par Koestler, dans son livre « The Ghost in the Machine ». Ce terme est un néologisme combinant le mot grec holos (le tout) et le suffixe –on- qui suggère une particule ou une partie (comme dans électron ou proton).

Koestler affirme que, bien qu'il soit facile de décomposer un tout en parties, ni les parties ni le « tout » n'existent au sens absolu dans la nature. Les organismes vivants, ou les sociétés humaines, peuvent ainsi être vus comme une hiérarchie d'entités semi-autonomes, décomposées elles-mêmes en sous-entités semi-autonomes.

Ces entités, à tout niveau hiérarchique, sont appelées holons. Les holons sont donc des systèmes ouverts et autorégulés, qui présentent les capacités d'autonomie d'un tout (tendance à l'affirmation de soi), mais aussi les capacités d'obéissance d'une partie (tendance à l'intégration dans le tout) (Pannequin R., 2007). Les systèmes de pilotage holoniques (HMS) se fondent donc sur cette dualité entre d'une part l'autonomie et la robustesse de l'holon, et d'autre part, sa soumission au contrôle venant d'holons hiérarchiquement supérieurs (Valckenaers P., 2001) (Ounnar F., et al, 2008). Un système holonique est une combinaison d'un système hétérarchique et d'éléments centralisés (Bongaerts L., et al, 2000).

L'architecture de référence PROSA a été définie pour le développement de systèmes de contrôle holoniques. Il s'agit d'un acronyme pour Product Resource Order Staff Architecture. En effet, cette architecture est composée de trois types d'holons (figure 27) auxquels s'ajoutent les holons staff: les holons produits représentent le savoir-faire utile à la réalisation des produits. (ex nomenclature, dossier de fabrication…), les holons ressources représentent les équipements permettant de réaliser la production (machines, opérateurs..); les holons ordres représentent les ordres de fabrication devant être exécutés et les holons staff dont la présence est optionnelle, permettent d'intégrer au système des centres de décision ayant un champ de vision plus large, par exemple un centre effectuant un processus de planification ou d'ordonnancement. Cependant, le pouvoir d'un tel holon est limité à un rôle consultatif.

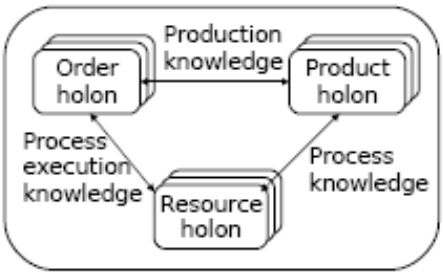


Figure 27 : Les trois types principaux d'holons dans l'architecture PROSA

Le problème qui se pose alors est le manque de visibilité sur l'exécution de la production par les fonctions de gestion de la logistique. En effet, la connaissance du système de pilotage centralisé est assujettie aux informations données par le système distribué. Puisque les décisions du système centralisé ne sont pas forcément respectées, il est impossible de prédire efficacement l'évolution future de l'atelier.

5.3 Encadrement des décisions distribuées par des décisions centralisées

Différentes formes d'hybridation entre une approche centralisée et une approche distribuée du pilotage sont possibles, une solution consiste à contraindre les prises de décisions, dans le système distribué, à respecter un cadre fixé par le système centralisé.

Pour obtenir des choix en nombre suffisant dans le système distribué, on peut jouer sur la précision du cadre de décision. Effectivement, si plus de possibilités sont offertes aux centres hiérarchiquement inférieurs, il devient alors possible de traiter plus facilement les problèmes rencontrés lors de l'exécution de la décision. On peut ainsi utiliser des plans flexibles. Par exemple, il est possible de fournir un ensemble d'ordonnancements admissibles, à la place d'un unique ordonnancement, afin de préserver la flexibilité (Artigues C.,et al., 2005). Il est aussi possible d'exprimer au niveau inférieur un plan flou. Ainsi, des travaux utilisant la logique floue, portent sur la prise en compte de l'imprécision et de l'incertitude dans la méthode MRP (Grabot B., et al., 2005). Prendre une décision, dans le système distribué, revient alors à réaliser le pilotage en respectant le cadre fixé. Si des événements particuliers se produisent, une solution correctrice (relevant éventuellement de mécanismes hétérarchiques de coordination, par exemple une négociation) sera recherchée. Si aucune solution n'est trouvée, le système centralisé est notifié, et doit réagir en conséquence (Tranvouez E., et al., 2006). On peut néanmoins craindre, si les décisions centralisées encadrent la prise de décision distribuée, que l'espace de liberté conféré à ces dernières ne soit considérablement restreint. En effet, l'accroissement de l'intégration des décisions, lié à l'utilisation croissante des APS se traduit concrètement par une augmentation de la précision de ces décisions.

Bon nombre de tentatives de couplage entre les approches centralisées et distribuées pour pilotage de la production reposent sur l'intégration directe entre les deux types de systèmes de décision, l'un des deux étant prédominant sur l'autre.

Le principe alternatif de contrôle par le produit repose sur une vision différente de l'entreprise, qui conduit à envisager différemment le problème de l'interaction centralisé/distribué, en postulant que le produit est l'élément central du système d'information, et plus particulièrement du système de pilotage.

5.4 Les systèmes contrôlés par le produit :

5.4.1 Concept

Le principe du concept SCP et de combiner de façon plus flexible des modes de pilotage centralisés avec des modes de pilotage distribués en tenant compte des capacités du produit à jouer un rôle actif de synchronisation des échanges entre différents systèmes d'entreprise de niveau « business » (ERP: Entreprise Resource Planning) et « process » (MES) (Voir figure 28).

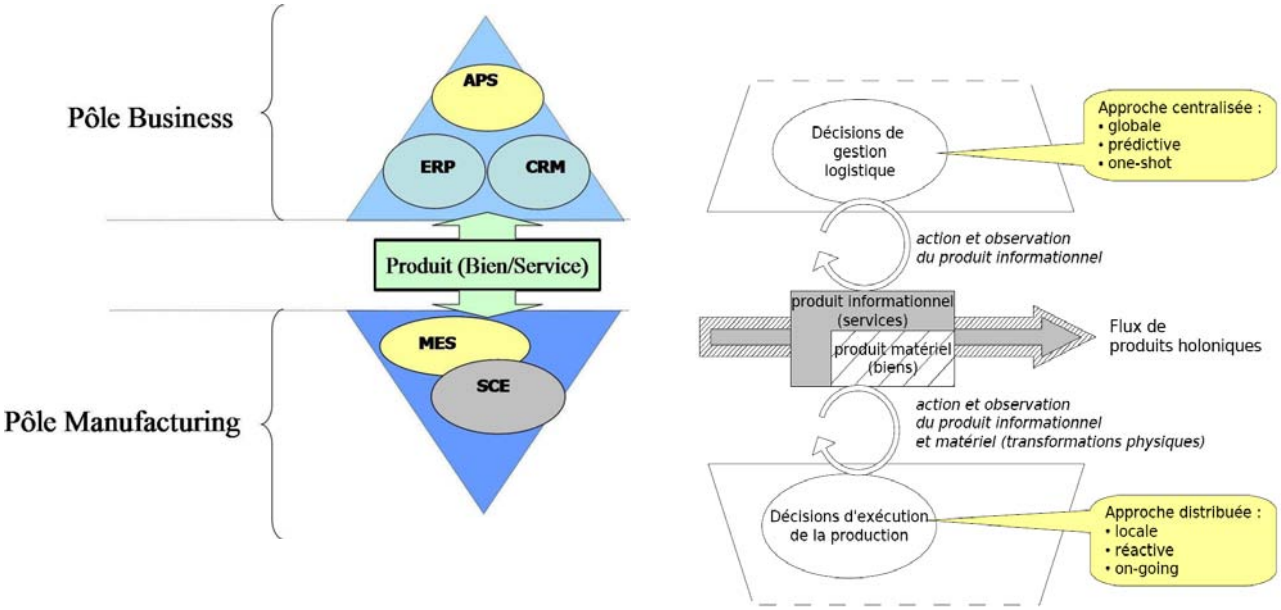


Figure 28 : Séparation des pôles Manufacturing et Business (Baïna S. and Morel G., 2006)

Cela passe par l'association de données de fabrication aux produits. Ainsi le produit pourra être représenté par une partie physique et une partie informationnelle (Voir figure 29).

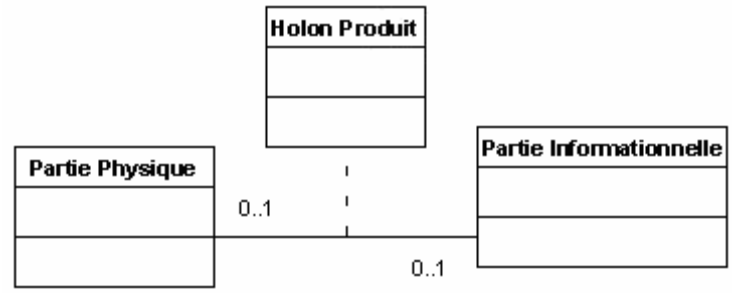


Figure 29 : Modèle initial de l'Holon

Ce principe n'est pas une révolution en soi puisque les pratiques industrielles utilisent déjà des fiches suiveuses pour indiquer le travail à réaliser. De même, il est courant de rendre compte d'une opération (d'un test qualité en particulier) par une marque sur une pièce. Prendre le produit comme pivot constitue en fait l'essence de la productique. Ainsi, dans le domaine de la conception, les environnements d'ingénierie collaborative se sont naturellement organisés autour d'une maquette numérique du produit.

Cependant, dans le domaine du pilotage, ces pratiques centrées sur le produit souffrent de limites importantes. Ainsi, les lectures et écritures sont difficilement automatisables, la dissociation entre le produit et le support de l'information peut être génératrice de pertes de données, et l'intégration des données des produits dans le système d'information de l'entreprise est difficile. Par ailleurs, le Kanban peut être vu comme une forme très simplifiée de contrôle par le produit. Dans un système de pilotage par Kanban, le travail sur un poste est déterminé par la présence des étiquettes Kanban. Toutefois, le domaine d'application du Kanban est limité à une production répétitive et à faibles variétés et souffre de la difficulté d'intégrer les données des produits aux systèmes d'information. Le paragraphe suivant a pour objectif de présenter l'apport des technologies d'Auto-ID dans l'amélioration des pratiques de pilotage centré produit.

5.4.2 Apport des technologies d'Auto-ID

L'Auto-ID consiste en l'identification de chaque produit de manière unique. En utilisant ce principe, et en déportant physiquement les capacités de mémorisation, de communication et de prise de décision sur des systèmes externes aux produits (automates programmables, bases de données, opérateurs …), il est possible d'assurer le suivi et le contrôle de chaque instance de produit et, donc, permettre de nouvelles pratiques de décision centrées sur le produit. (Voir figure 30)

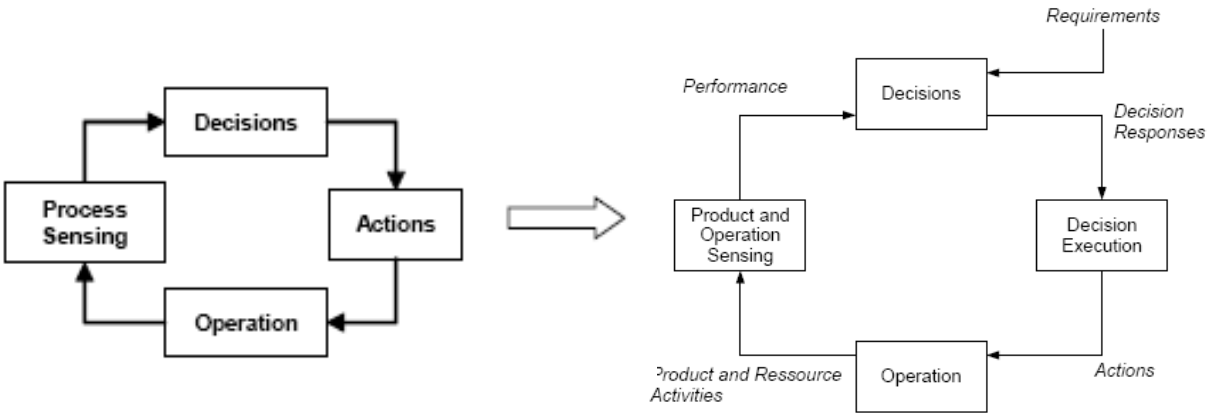


Figure 30 : Le passage à une boucle de contrôle incluant le produit informant

Technologiquement, le lien entre le produit et les informations le concernant peut être réalisé à l'aide d'un code EPC (Electronic Product Code) (Brock David L., 2002) implanté dans une puce (ou « tag ») embarquée sur le produit. Ces puces utilisent la technologie d'Identification par Radio Fréquences (RFID) (Petit P., 2003) pour transmettre leur identifiant aux ressources de production, par le biais de lecteurs adaptés. Ces techniques ont pour but de permettre un meilleur suivi des produits par une identification sans contact, et sans contraintes physiques d'observabilité Comme nous l'avons évoqué, ces pratiques d'identification et d'annotation ne sont pas nouvelles. Il y a donc qu'une différence de niveau et non une différence de nature, entre ces technologies nouvelles et des pratiques plus anciennes. Cependant, cette différence de niveau conduit à un changement de nature dans la manière de concevoir le rôle du produit dans le système de production.

D'un point de vue applicatif, nous pouvons citer quelques exemples montrant l'intérêt de l'utilisation de l'Auto-ID. Par exemple, dans le cas d'une cellule flexible d'assemblage sur laquelle chaque produit porte un identifiant (Mcfarlane D.,et al. , 2003), il est possible de connaître quels sont chacun des composants d'un produit final assemblé. Il est également possible de s'apercevoir qu'un produit d'un certain type n'est pas dans le bon magasin. Le robot assurant la mise en place des composants est capable de lire l'identifiant de chaque composant, et, en interrogeant une base de données, est capable de vérifier qu'il assemble le bon composant sur le bon produit. Il est également capable de ranger à sa place un produit qui aurait été déplacé, et qui ne serait plus dans le magasin approprié.

Dans le cadre du projet « objet nomade 2 » une application a été réalisée avec un fabriquant automobile français. En effet, les technologies RFID permettent d'embarquer sur

[2] Un objet nomade de production est défini comme un objet capable de fournir des données aux clients, coopérer avec les autres entités participant à son évolution, adapter ses règles de décision en fonction de l'expérience acquise durant les phases précédentes de son cycle de production, coordonner des processus de décision et s'auto-finaliser ou imaginer.

un véhicule une base des données techniques qui l'accompagne tout au long de son cycle de vie, et offre des services principalement relatifs aux services d'après-vente (Bajic E. and Chaxel F., 2002). Des travaux plus récents (Parlikad A-K. and McFarlane D., 2007) ont porté sur la prise de décision en « fin de vie » des produits. En effet, les fabricants sont maintenant légalement contraints de reprendre les produits usagés, dans le domaine du gros électroménager. Les alternatives sont le recyclage complet (destruction), la conservation de certaines pièces, ou encore le reconditionnement. Alors que les informations liées aux produits disparaissent en général dès sa vente, il a été montré qu'un système d'information lié au produit par RFID permettait de les conserver, et ainsi d'améliorer la pertinence de la décision de fin de vie.

Karkkainen M., 2003 (Karkkainen M., 2003) associé la notion de produit intelligent à la gestion individuelle de chaque produit au travers de son cycle de vie en intégrant le flux informationnel et physique dans le but d'offrir des services en utilisant un réseau Internet. Dans le même cadre, (Mcfarlane D., et al, 2003)) montre la manière dont un « produit intelligent » (un produit lié de manière permanente avec sa représentation informationnelle et capable d'être actif) influe sur le pilotage de la production, qu'il soit centralisé ou distribué (Voir figure 31).

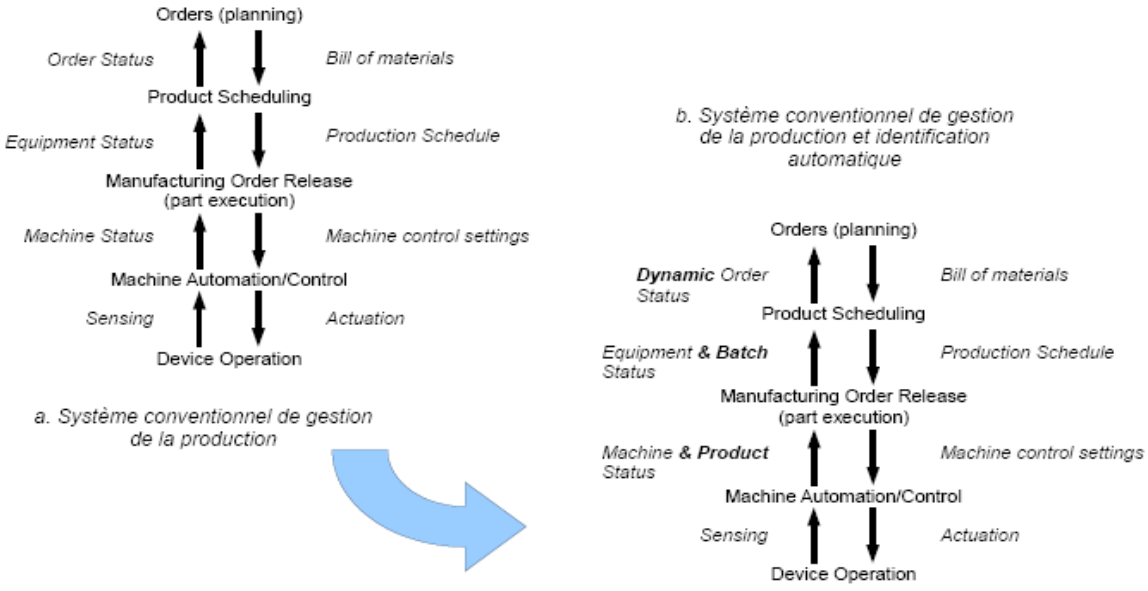


Figure 31 : Impact de l'identification automatique sur les systèmes classiques de gestion de production

L'utilisation des technologies RFID conduit donc à une modification des pratiques, en conférant aux produits des fonctions nouvelles. Des classifications plus générales de ces fonctions, ne dépendant pas d'une technologie particulière, ont été proposées.

Du point de vue des services offerts par l'objet dans le cadre d'une intelligence ambiante, on peut distinguer (Cea A., 2006):

- l'objet porteur de données,
- l'objet pointeur vers un système d'information,
- l'objet fournisseur et demandeur de services,
- l'objet sensitif enrichi avec des capteurs et des actionneurs.
- Du point de vue des fonctions de communication et d'identification (Wong C., et al., 2002), le produit intelligent peut :
    - posséder une identification unique,
    - être capable de communiquer efficacement avec son environnement,
    - pouvoir mémoriser ou stocker des données au sujet de lui-même
    - disposer d'un langage de communication pour transmettre ses caractéristiques et ses besoins pendant son cycle de vie,
    - être capable de participer ou de prendre des décisions appropriées à son propre destin de façon continue.

Grâce à l'apport des technologies Auto-ID le produit « actif » devient l'élément central dans l'amélioration du pilotage de la production en permettant un pilotage hybride, dont nous avons montré l'utilité, entre des systèmes centralisés et distribués. Cependant, la plupart des travaux sur les systèmes contrôlés par le produit n'ont pas été validé sur une application à échelle industrielle mais plutôt sur des plates-formes expérimentales (prototype ou émulation). (Trentesaux D., 2008) présente une synthèse sur les travaux de la communauté de recherche dans ce cadre.

6. CONCLUSION CHAPITRE II

Dans ce chapitre nous avons présenté l'évolution des systèmes de pilotage pour répondre à des besoins de réactivité et de robustesse face aux changements de la production. L'évolution des systèmes d'entreprise peut être alors caractérisée par le modèle E.I.C.M. « Enterprise Integration Capability Model » de (Hollocks B.W., et al., 1997)(voir Tableau 2) selon les architectures qu'ils mettent en œuvre: hiérarchisées, intégrées, distribuées (interopérables) et intelligentes au sens donné par (Valckenaers P., 2001) qui propose de doter chacune des entités du système de production d'une réelle capacité de décision afin de les rendre autonomes, capables de s'adapter à leur environnement et de coopérer pour satisfaire à la finalité globale.

Niveau 5 : Adaptable	Les processus sont capables de s'auto-organiser et de s'adapter à des variations inconnues de leur environnement
Niveau 4 : Interopérable	Les processus peuvent coopérer en utilisant les services d'autres îlots pour atteindre leurs objectifs
Niveau 3 : Visible	Les processus sont capables de s'informer mutuellement en produisant des données compréhensibles pour leur environnement
Niveau 2 : Rigide	Les processus sont coordonnés par des liens rigides
Niveau 1 : Fragmenté	Les processus sont cloisonnés et opèrent de façon indépendante

Tableau 2. Modèle « Enterprise Integration Capability Model » (Hollocks *et al.* 1997)

En effet, nous sommes passés des architectures hiérarchiques, comme celles mises en œuvre dans MRPII, à des architectures intégrés (ERP et APS), puis ensuite à des architectures distribuées (Kanban/ intelligence artificielle…). Pour atteindre le niveau adaptable selon le modèle EICM, nous avons montré la nécessité d'un pilotage hybride centré produit qui permet, à la fois, une réactivité (ou une adaptation) face aux événements terrain en prenant des décisions locales et permet une optimisation globale en tenant en compte des décisions centralisées.

La mise en œuvre d'un tel système pilotage est aujourd'hui facilitée par les technologies d'Auto-Identification. Ces technologies permettent aux produits de porter de manière permanente et continue (ou de manière discontinue dans le cas d'un process discret), des informations. Le produit peut aussi en donner à et/ou en capter de son environnement immédiat. Il peut enfin sur la base de ces informations, et faisant suite à un traitement qu'il opérerait lui-même, prendre des décisions relatives à son propre devenir et les faire appliquer par les éléments constitutifs de son environnement. Cependant, l'utilisation de ces technologies d'auto-identification à l'échelle industrielle reste limitée. Cela est dû en partie à la difficulté d'établir le retour sur investissement des projets Auto-ID, la validation de la pertinence des infrastructures (nombre de lecteurs, leur emplacements, l'objet porteur de l'étiquette (produit, palette, lot…)), intégration aux systèmes d'informations, dépendance forte au système de production étudié et surtout le niveau de maturité des SCP qui reste limité à des prototypes ou à des plates-formes d'émulation.

Une démarche d'ingénierie est donc nécessaire pour concevoir un SCP adapté « au plus juste » au système industriel étudié. Dans le chapitre suivant nous présenterons les différentes approches pour la construction et l'intégration d'un SCP, en particulier dans le cadre des systèmes organisés en DFT.

III Ingénierie des systèmes contrôlés par le produit

1. INTRODUCTION CHAPITRE 3

Nous avons vu que le pilotage par le produit permet de répondre à la problématique industrielle de synchronisation de flux de production, en proposant un pilotage hybride entre décisions centralisées à vocation long terme (logistique et gestion d'entreprise) et des décisions distribuées à vocation court terme (exécution). Cette hybridation est rendue nécessaire par le besoin de répondre à des exigences de traçabilité, de flexibilité, de gestion de la variété des produits et de robustesse par rapport à des conditions de fonctionnement incertaines.

Si l'implémentation d'un tel système peut reposer aujourd'hui sur une utilisation des technologies d'Auto-identification comme le RFID /codes-barres/WSN, sa conception nécessite une méthodologie particulière pour différentes raisons.

Une première raison tient à la conception même de l'architecture physique du SCP. A part les technologies de géolocalisation dont les coûts et les fonctionnalités ne sont pas justifiés en cas de processus discrets, les technologies RFID traditionnelles conduisent à des reports d'informations discrets induits par une succession de points de lecture (voir la figure 32). Dans le contexte de la DFT et, en particulier, dans le cadre de la synchronisation des lignes d'assemblages et des feeders, les emplacements des lecteurs ont un impact sur la réactivité et la capacité d'anticipation des processus de prise de décision. En effet, si le lecteur est disposé en début de la ligne principale (position 1 dans la figure 32), cela signifie que la décision de fabriquer les composants sera prise avec beaucoup d'anticipation et, par conséquent, l'IPK sera saturé rapidement (cette situation est équivalente au pilotage centralisé par le fait que l'information issue du lecteur est disponible au même moment que l'est l'ordre de fabrication issu de l'ERP). Si le lecteur est positionné au niveau de l'emplacement « IPK » (position 2), cela signifie que la décision est prise sans la capacité de réaction à des événements perturbateurs (l'intervalle de visibilité est très court).

Par conséquent, l'architecture d'implémentation des lecteurs peut être considérée comme un élément important dans l'ingénierie d'un SCP. Une approche méthodologique est donc nécessaire pour choisir le meilleur emplacement des lecteurs en se basant sur une définition claire des exigences du système de contrôle et sur l'évaluation des solutions proposées conformément aux indicateurs de performance.

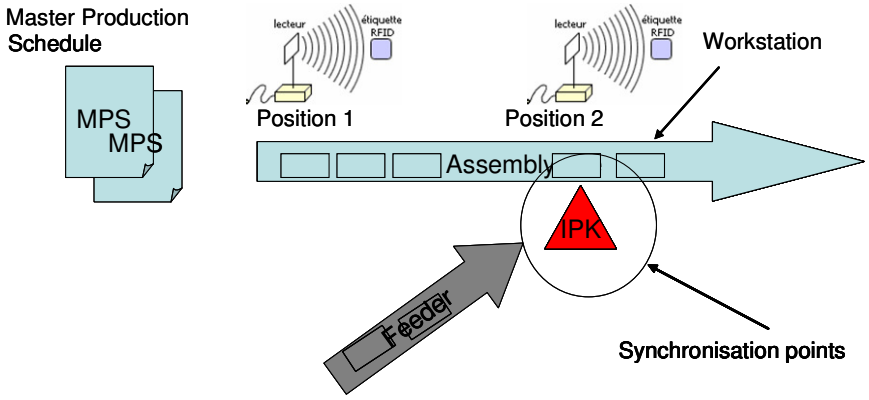


Figure 32: Implémentation des lecteurs RFID dans le contexte de la DFT

Par ailleurs, une autre raison réside dans le fait que la conduite d'un tel projet de conception et d'intégration nécessite de définir des exigences clients très variées (pilotage, traçabilité, système d'information, etc…) en établissant un cahier des charges fonctionnel (CDCF), mais aussi d'en déduire des indicateurs de performances du système étudié. Ce besoin s'inscrit bien dans les pratiques en vigueur dans le contexte industriel. En effet, l'entreprise TRANE a adopté pour la norme ISO 9001 depuis 1987. Cette norme internationale préconise l'utilisation d'une approche processus pour tous les produits de l'entreprise (biens ou services), du développement à la mise en œuvre. Elle préconise, surtout, l'amélioration continue du système de management de la qualité en s'appuyant sur la mesure de performance et sur l'analyse des dysfonctionnements observés. Dans le but de satisfaire les clients, il est nécessaire d'évaluer les informations concernant leur perception du niveau de réponse de l'entreprise à leurs exigences. Ainsi cela est décliné en indicateurs de performance dont les exemples types sont le taux de service, la productivité, etc.… (voir la figure 33).

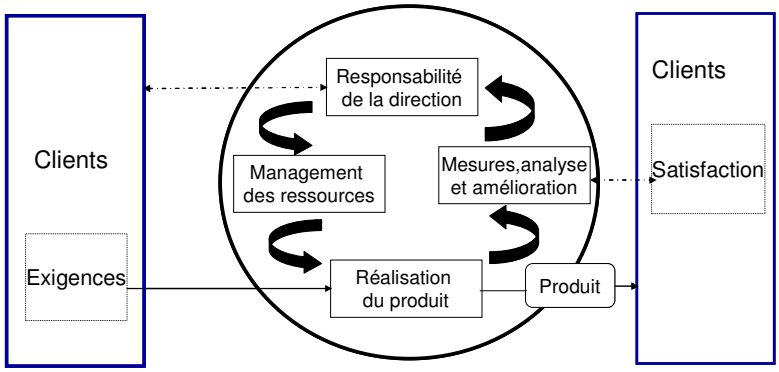


Figure 33 : Approche processus préconisée par la norme ISO 9001

D'autre part, pour valider les différentes solutions de SCP, le groupe IMS-NoE (Cavalieri S., et al., 2003) (Valckenaers P., et al., 2006) a montré que la simulation basée sur l'analyse

comparative des systèmes complexes reste le meilleur moyen pour faire la preuve de l'efficacité, avant leur déploiement, d'un système de contrôle à l'échelle industrielle.

La simulation d'un système manufacturier complexe exige une modélisation modulaire et une mise en évidence des différents flux du système étudié (Galland S., 2001). Dans le cas de l'entreprise TRANE ce besoin est renforcé par le problème de la flexibilité des opérateurs Ainsi, lorsqu'un opérateur est inactif sur son poste de travail, il doit se déplacer sur le poste en amont ou en aval, en fonction de ses compétences. Toutefois, la mobilité pose un problème de modélisation dans la mesure où la date de fin d'une opération en cours, qui avait été programmée lorsque l'opération avait été démarrée, peut être remise en question à tout moment par l'arrivée d'un nouvel opérateur. Des modules de simulation spécifiques doivent donc être développés pour tenir compte de cette mobilité des ressources. Ces modules seront les résultats d'un couplage entre une partie physique et une partie du système de pilotage.

Comme nous l'avons mentionné au début de ce chapitre la conception et l'intégration d'un SCP doit passer par une définition claire des exigences client et des performances attendues par le système. Ensuite, pour valider les solutions SCP proposées, des modèles de simulation doivent être construits en tenant en compte des spécificités d'un SCP et du contexte de la DFT.

Par conséquent, dans la suite de ce chapitre, nous présenterons les différentes approches de modélisation des exigences qui permettent de déduire des indicateurs de performances. Dans le deuxième paragraphe nous discuterons de la modélisation des systèmes de pilotage. Il s'agira d'expliquer la notion de modèle et de modélisation avant de présenter les différents modèles de pilotage et la particularité d'un modèle SCP.

Dans le paragraphe suivant, nous présenterons les différentes approches d'évaluation par la simulation. En particulier nous présenterons deux modes de simulation : software-in-the-loop et Hardware-in-the-loop. Les points communs de ces deux approches sont l'utilisation d'un modèle d'émulation pour représenter le système physique (Pannequin R., 2007), d'une part, celui-ci sera couplé avec le système de pilotage ou un modèle de ce dernier, d'autre part. La différence entre ces deux approches réside dans le fait que dans le cadre de software-in-the-loop, le système de pilotage est représenté par une implémentation simplifiée des règles de contrôle sous forme d'algorithmes ou d'heuristiques et vise à valider les règles de pilotage alors que la deuxième approche s'intéresse à la validation du vrai système de pilotage ainsi que de ses interactions avec le modèle d'émulation et les systèmes d'information de l'entreprise.

Ensuite, le problème de la réutilisation sera soulevé en particulier pour tester plusieurs stratégies de pilotage. Nous conclurons ce paragraphe en mettant en évidence les besoins de

la phase de modélisation pour faciliter et maitriser la construction des modèles de simulation ainsi que le problème de synchronisation des modèles (modèles d'émulation et modèles de pilotage). A la fin du chapitre, nous faisons apparaître la nécessité de proposer une méthodologie de conception et d'intégration des SCP.

2. EXPRESSION DU BESOIN

L'étude des besoins clients a toujours été une étape importante dans la conduite des projets de conception des produits (biens ou services). Cependant, les différents outils ou approches utilisés se limitaient à l'établissement d'un cahier des charges et ne permettaient pas un suivi par la mesure d'indicateurs, tout au long du projet, du degré de réponse du produit conçu aux besoins exprimés par les clients. Aujourd'hui plusieurs approches préconisent un pilotage de ce type de projets par la mesure de la performance. Dans le cadre spécifique de notre étude, ce besoin a motivé l'utilisation de la simulation comme outil de conception pour permettre l'évaluation de plusieurs solutions.

(Dupuy M., 2005) fait le constat que deux grands courants de pensée s'intéressent à l'entreprise pour ce qui est de l'amélioration de ses performances en se basant sur des indicateurs mesurables. Le premier est issu de la recherche et se retrouve sous le vocable de modélisation d'entreprise. De nombreux travaux de ce courant ont trait à l'amélioration d'entreprise et des méthodes utilisées industriellement en dérivent. Le second courant est plutôt issu de la pratique industrielle et est généralement dénommé amélioration continue. Il s'appuie sur de nombreuses mises en pratique industrielles et a été formalisé dans plusieurs méthodes.

2.1 Approches académiques

Pour étudier les performances d'un système industriel et comprendre son fonctionnement dans les différentes phases du cycle de développement, plusieurs formalismes ont été proposés (diagrammes statiques, dynamiques, fonctionnels, structurels, informationnels, etc). Parmi ces formalismes, nous citons les modèles issus des domaines du génie informatique, tels que UML ou ses extensions RT-UML (Selic B., 1998) ou UMsdL, et de l'ingénierie système, tels que SysML ou les modèles proposés par Sagace (Pénalva J-M., 1997).

En particulier, dans le cadre de la modélisation des exigences, ces approches proposent des formalismes permettant la définition et la structuration des exigences sous la forme de scénarios de fonctionnement (cas d'utilisation d'UML) ou de diagrammes objets (diagramme des exigences de SysML). Ces derniers, à l'instar des modèles proposés par la méthode KAOS (Heaven W. and Finkelstein A., 2004) et son outil support Objectiver, définissent une exigence comme un objet possédant des attributs propres (source de l'exigence, type, niveau

de priorité, méthode de vérification etc.) et étant en relation avec d'autres exigences (relation de raffinement, d'implication) ou d'autres objets supports (acteurs, fonction, composants, etc.).

2.2 *Approches industrielles*

Dans l'industrie les approches les plus connues et également les plus utilisées pour étudier et améliorer les performances d'un système industriel sont les approches dites d'amélioration continue (Dupuy M., 2005). Ces approches sont génériques et engagent durablement dans des actions de changement plusieurs secteurs de l'entreprise sous la responsabilité de la direction. Elles ont pour phases principales d'analyser l'existant, de déterminer les performances actuelles et d'estimer dans quelle mesure et comment ces performances peuvent être améliorées. Nous citerons la Production au Plus Juste (le lean manufacturing), le Kaizen (Imai M., 1998) le six-sigmas, le Management par la Qualité Totale (TQM : Total Quality Management), la Maintenance Productive avec la participation de tous (TPM : Total Productive Maintenance) (Nakajima S., 1989) (Japan Institute of Plant Maintenance, (1997)) etc…

Design For Six-Sigmas (DFSS) adapte les concepts généraux de la méthode six-sigmas à la conception ou à la reconception de nouveaux produits ou processus. Son apport en conception réside dans la traduction des attentes ou besoins des clients en caractéristiques mesurables représentant le degré de satisfaction des clients ("critical to quality" ou CTQ) et qui permettent de choisir et de fiabiliser les produits, prestations et processus répondant au mieux aux attentes. DFSS préconise 5 phases principales relatives à la définition des exigences des utilisateurs (define), la définition de caractéristiques quantifiables et mesurables traduisant le respect de ces exigences (measure), l'analyse des solutions envisageables (analyse), la conception du produit ou processus (design) et enfin la vérification des résultats de conception vis-à-vis des indicateurs spécifiés (verify).

Dans le cadre de ces travaux de thèse, les pratiques industrielles et en particulier celles de la société TRANE ont beaucoup influencé nos choix. Pour exploiter l'expérience acquise dans l'entreprise et pour assurer le standard méthodologique en usage, nous avons opté pour la méthode DFSS. Cependant celle-ci ne permet pas d'évaluer les propositions de conception, nous avons pensé que la simulation pourrait pallier ce manque. Par ailleurs, cette méthode manque aussi de formalismes et d'outillages d'assistance pour la construction des modèles. Certaines approches académiques le permettant, nous avons pensé en intégrer aussi dans notre proposition.

3. LA MODELISATION DES SYSTEMES DE PILOTAGE

Avant d'étudier la modélisation des systèmes de pilotage, nous avons jugé nécessaire d'introduire la notion de modélisation et de modèle, d'une manière générale, afin de positionner la classe des modèles de notre étude.

3.1 Notions de modélisation et de modèle

D'après Potier D, « la technique de modélisation doit être considérée comme une démarche expérimentale semblable à celle d'un physicien qui, devant un phénomène mal connu, est amené à construire des instruments de mesure appropriés, à observer le phénomène, à l'analyser et tenter à l'aide d'un modèle d'expliquer et prévoir son comportement ... ».

Ainsi nous pratiquons tous la modélisation. Elle précède toute décision ou formulation d'une opinion. Celle-ci n'est qu'un outil qui doit servir à répondre à la question initiale pour laquelle un modèle est développé.

Un modèle peut donc être considéré comme une représentation et donc une interprétation explicite de la compréhension d'une situation faite par son utilisateur, ou plus simplement de l'idée qu'il se fait sur une situation. Il constitue ainsi une vue plus ou moins abstraite et partielle de l'existant. Il existe différents types de modèles. Les modèles ***physiques*** sont ceux dans lesquels le système réel est représenté par une réplique ou maquette, à une échelle différente. Les modèles ***symboliques*** sont une abstraction mathématisée de la réalité. Ils sont en général exécutés sur un calculateur.

La prise en compte des aléas ou des variabilités dans le modèle en induit une autre typologie. Quand ils sont qualifiés de ***déterministe***s, leur influence est considérée comme négligeable. Le plus souvent, ces événements doivent être représentés car ils jouent un rôle significatif (pannes, ...). On a alors affaire à des modèles ***stochastiques***. Une troisième dichotomie sépare les modèles ***statiques*** et les modèles ***dynamiques.*** Dans les premiers, le temps n'intervient pas. Dans les seconds, il est un facteur essentiel du comportement et de l'état du système.

Enfin dans les modèles dynamiques, on distingue les modèles ***discrets,*** dans lesquels l'état du système ne change qu'à certaines dates (exemple d'une file d'attente devant une machine), et les modèles ***continus*** où ce changement est permanent. Un modèle qui contient à la fois des composantes discrètes et continues est dit ***mixte/hybride***.

Le choix de la méthode de modélisation dépend, donc, fortement de la nature du système réel et de sa représentation.

Dans le cadre de la modélisation des systèmes industriels (Law A.and Kelton W., 1991) qui conduit à l'utilisation de la simulation à événements discrets, un des formalismes les plus utilisés est celui des réseaux de files d'attente. En effet, les outils classiquement mis en œuvre dans ce domaine, tels ARENA, SIMPLE, etc … sont construits sur la base de ceux-ci. La théorie des files d'attente est un outil permettant de prendre en compte et de modéliser la dynamique des processus industriels ou tertiaires. Elle fait appel à des méthodes statistiques et algébriques qui sont des applications temporelles des chaînes de Markov, lequel formalisme permet l'étude de phénomènes aléatoires dans lesquels le résultat d'une expérience peut influer sur l'expérience suivante.

En utilisant des lois de probabilité et en s'appuyant sur des quantifications des fréquences d'arrivée d'événements (λ) sur un poste faisant l'objet de l'étude et des durées de service (μ) de ce dernier, ce formalisme permet de calculer des taux de service, des délais, des longueurs de files d'attente, des probabilités d'apparition de tel ou tel autre événement.

$$p_k \cong \frac{(\lambda t)^k}{k!} e^{-\lambda t}$$

La relation precedente représente la probabilité d'observer k arrivées d'événements dans un intervalle de durée t. Il s'agit d'une distribution de Poisson. Par analogie avec la forme générale de la loi de Poisson, le paramètre λ est le taux moyen d'arrivée (taux moyen d'apparition) d'événements par unité de temps.

Dans ce type de formalisme on pourra déterminer par exemple la file d'attente moyenne devant un poste par :

$$f = \frac{\lambda}{(\mu - \lambda)}$$

Après avoir présenté les notions de modélisation et de modèles d'une façon générale, le paragraphe suivant se focalisera sur celles en usage pour les systèmes de pilotage.

3.2 La modélisation des systèmes de pilotage

La modélisation des systèmes de pilotage diffère selon la nature des problèmes à résoudre (Wegner P., 1997) ((Valckenaers P., 2001) les problèmes ponctuels (synchroniques) qui se déclenchent d'une façon périodique et les problèmes d'évolution **(diachroniques)** qui se déclenchent par événement.

Un exemple de résolution des problèmes de décision de type **synchronique** peut être trouvé dans le système de planification hiérarchique (HPS hierarchical planning and scheduling) (Vollmann T.E., et al, 1997). Les méthodes de résolution sont principalement **hors ligne** et généralement **déterministe**. Elles reposent sur la capacité des algorithmes de

recherche opérationnelle à fournir un plan d'action optimal en fonction de l'état courant du système. Ainsi, les informations collectées sur le système opérant sont les paramètres d'entrée d'une fonction, dont le résultat constitue l'optimum à mettre en œuvre par la suite.

En parallèle les systèmes distribués de production, posent des problèmes de type **diachronique** et adoptent un mode de résolution **en ligne**. Les centres de décision sont en interaction permanente avec leur environnement (système opérant, acteurs externes, ...). L'arrivée d'un événement déclenche les procédures de décision, produisant si besoin une action correctrice. Les systèmes d'inspiration biologique se comportent de cette manière. Pour modéliser ces systèmes, la majorité des travaux de recherche ont opté pour une utilisation conjointe des outils de simulation à événements discrets pour modéliser le système opérant et des outils issus du domaine de l'intelligence artificielle, comme les systèmes multi-agents, pour modéliser le système de pilotage (Valckenaers P.,et al., 2006) (Blanc P., 2006) (Pannequin R., 2007). Cependant ces approches souffrent de la complexité de la mise en œuvre dans un contexte industriel à grande échelle. Cela est dû à la prise en compte du concept de l'émergence (voir chapitre 2) et le niveau d'expertise demandée pour développer ce type de système.

Le SCP fait partie de cette deuxième catégorie avec la particularité, qu'en plus d'être en permanence lié au système opérant, il est fortement lié au système de pilotage centralisé. Par conséquent, dans le cadre de la modélisation d'un SCP, la solution proposée ne peut être testée indépendamment de ces deux systèmes.

Ce constat conduit à envisager l'étude, en complément des modèles de pilotage, de **la modélisation pour la simulation du système opérant** et **du développement de l'interface de communication** à la fois avec le modèle du système opérant et avec les différents systèmes d'informations de l'entreprise. Ces trois éléments constitueront une architecture qui se veut générique pour la validation la pertinence des SCPs.Dans la suite de ce chapitre (la partie 4) nous présenterons d'abord les différents types de simulations pour valider les solutions proposées puis les outils et les méthodes de modélisation pour la simulation du système opérant et enfin le système de communication entre les différents éléments de l'architecture d'évaluation.

4. VALIDATION PAR SIMULATION (SIMULATION SED)

4.1 Les techniques d'évaluation

Les techniques usuelles permettant de s'assurer de la pertinence et de la qualité d'un modèle ou d'un système réel vis-à-vis des attentes exprimées par les utilisateurs sont la simulation, l'émulation et le test.

Selon la nature des interactions entre objets simulés et objets réels, (Isermann R., et al., 1999) distinguent trois approches différentes (mais qui peuvent être complémentaires).

La figure 34 met en évidence différentes techniques de l'évaluation : la simulation d'un modèle de commande couplé à des éléments réels non modélisés, la simulation en boucle fermée des modèles de commande et des processus physiques, et enfin l'émulation des systèmes physiques afin de valider, (Corbier F. , 1989) en plate-forme, le système de commande réel

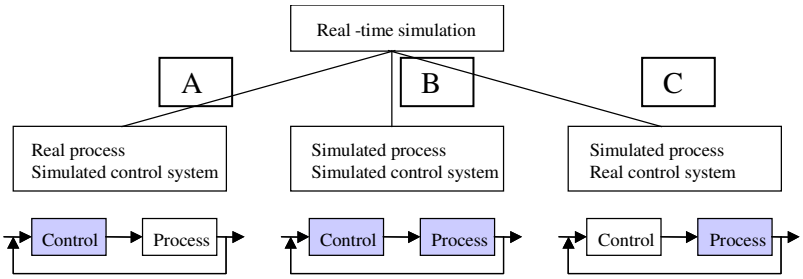


Figure 34: Techniques d'évaluation (Isermann *et al.*1999)

Dans notre étude nous intéressons spécialement aux deux derniers modes, dans la mesure où notre choix a été de tester le système de pilotage réel sur une plate-forme virtuelle (process simulé dans la figure 34) avant la mise en œuvre dans l'atelier.

Ces différents modes correspondent dans la terminologie mécatronique respectivement au software-in-the-loop (B) et Hardware-in-the-loop (C).

4.1.1 Software in the loop

Dans cette technique de simulation, les règles de contrôle (prototype du système de contrôle) sont appliquées au modèle d'émulation. Cette première étape d'évaluation a pour objectif de tester les algorithmes de prise de décision. Cette situation expérimentale est proche de la pratique traditionnelle de simulation, mais insiste nettement sur la séparation entre modèle de contrôle et modèle du système opérant (modèle d'émulation).

4.1.2 Hardware in the loop

Ce mode de simulation consiste à valider le comportement d'un système de contrôle réel, émulé au sein de son contexte environnemental. Le principal avantage réside dans le fait que la validation peut être transposée dans une plateforme virtuelle sans avoir à utiliser le système physique réel, ce qui réduit le temps de développement et de mise en œuvre.

La volonté de différencier le modèle du système de pilotage et le modèle du système opérant est motivée à la fois par des besoins pratiques et structurels, mais aussi par le besoin de réutilisation afin de tester différentes stratégies de pilotage sans devoir changer le modèle du système physique.

4.1.3 *Test de différentes stratégies (réutilisation)*

Dans la communauté scientifique du domaine de la simulation, le besoin de la réutilisation n'est pas récent. Plusieurs travaux ont été effectués dans ce champ de recherche, on notera les travaux publiés dans les conférences (Sargent R-G, 1986). (Robinson S., et al., 2004) ont donné une définition à « Modèles de simulation réutilisables». Ils ont également montré les motivations pour le développement des modèles réutilisables: le coût, et la crédibilité de la réutilisabilité. Plusieurs niveaux de la réutilisabilité ont ainsi été établis (voir figure 35).

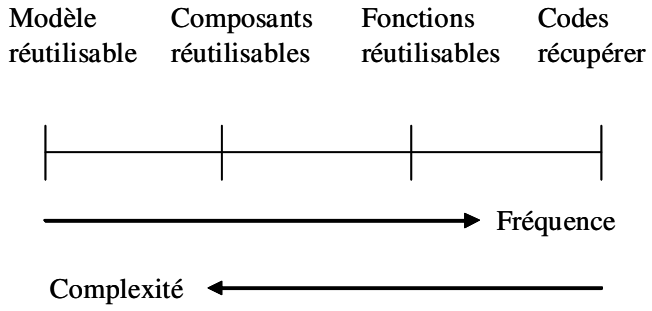


Figure 35: Echelle de la réutilisabilité

Ces différents niveaux sont organisés selon deux axes la fréquence et la complexité. On trouve que le « code récupéré » et les « fonctions » sont les plus fréquemment utilisés grâce au développement des langages de programmation et à l'arrivée des langages orientés objets. D'autre part, l'apparition des méthodologies comme CM ((Nancy R., 1994)), (US Air Force, 1998)ASCI (Kellert P. and Force C., 1998) (Kellert P. and Ruch S., 1998) ont permis de répondre à cette problématique au niveau de l'analyse et de la conception, et au niveau de l'implémentation en préconisant de développer des composants réutilisables. Cependant, à notre connaissance, aucune méthodologie de ce type n'a étudié le niveau supérieur qui est d'avoir des modèles réutilisables.

4.2 *La modélisation pour la simulation du système opérant*

Faisant référence au vocabulaire que nous avons proposé dans la section précédente, le modèle du système physique doit répondre aux critères suivants :

- **symbolique :** nous désirons réaliser des modèles exécutables sur ordinateurs ;
- **stochastique :** la prise en compte de phénomènes aléatoires au sein d'un système de production est nécessaire (pannes, taux d'occupation : mobilité des opérateurs, ...) ;

- **dynamique :** le temps est un facteur important pour la simulation d'un système de production. En effet, le comportement de ce dernier peut évoluer en fonction ou durant le déroulement du temps ;

- **discrète :** nous considérons que le système d'exploitation doit faire face à des évènements qui ont la caractéristique de se produire à n'importe quel moment et de changer l'état du système modélisé (arrivée d'un ordre de fabrication, arrivée de matière première, fin de fabrication d'un produit fini, ...).

L'un des problèmes majeurs rencontrés lors de la modélisation pour la simulation d'un système manufacturier est le manque de définition formelle des éléments le constituant. Les modèles de base de la simulation tels que les réseaux de Petri (David R. and Alla H., 1992) ou la théorie des files d'attentes permettent, eux, de modéliser convenablement un système industriel.

Malheureusement, ils restent d'une grande complexité à maîtriser et à utiliser. Créer, en les utilisant, un modèle de simulation reste très difficile et long. Pour un industriel, l'investissement en moyens humains et financiers est considérable et probablement irréalisable (Galland S., 2001).

Face à cela, la communauté scientifique ainsi que des sociétés commerciales ont développé des outils de simulation dédiés aux systèmes industriels. Nous citerons par exemple les langages SIMAN, ARENA, WITNESS Tous ces outils offrent la possibilité de modéliser un système industriel à l'aide d'objets facilement appréhendables (files d'attentes, zones de stockage, unités de traitements, ...).

Malheureusement, techniques de modélisation et outils de simulation influencent fortement la vision des concepteurs. En effet, les éléments de modélisation peuvent y être représentés de manières différentes. Ainsi, et posant le problème de réutilisabilité, l'utilisation d'un outil ou d'un autre nécessite souvent la réécriture totale du modèle de simulation.

De plus la qualité des modèles de simulation (rapport entre la réponse aux besoins en simulation d'un modèle et sa complexité (syntaxique)) est fortement dépendante des compétences des concepteurs. Rares sont les règles définissant les organisations structurelles (artefacts de modélisation représentant les éléments composant un système industriel) et sémantiques (règles de bonne construction d'un modèle de système industriel) acceptables pour les modèles de simulation. L'existence de ces règles de construction serait utile pour aider les concepteurs à définir et vérifier leurs modèles.

Pour répondre aux problèmes de la définition des organisations structurelles ou sémantiques du système étudié et garantir l'indépendance de celles-ci par rapport aux outils de simulation (comme ARENA, WITNESS…), certaines méthodes proposent l'utilisation des modèles de connaissances.

En effet, la construction d'un modèle de simulation comme toute modélisation d'un système (industriel) nécessite une perception du monde réel (analyse de l'existant) par l'énumération des ressources (produits, acteurs, moyens), des fonctions et des processus. Cela peut passer par un modèle dit de connaissances (Gourgand M., 1984). Le modèle de connaissance ou de fonctionnement d'un système (ou encore modèle descriptif de la structure et du fonctionnement d'un système) est une formalisation dans un langage naturel ou graphique de la structure et du fonctionnement de celui-ci. Si le système existe, le modèle de connaissance contient l'ensemble des connaissances acquises lors de phases d'observation. Si le système n'existe pas, le modèle de connaissance contient les spécifications de topologie et de fonctionnement des concepteurs. Ce modèle se doit d'être le plus générique possible. D'où la nécessité d'une mise à jour par le mécanisme de généralisation. Le modèle de référence servira de guide pour la construction des modèles de simulation qui serviront à évaluer le système réel. Le passage du modèle de référence au modèle de simulation doit être supporté par des règles bien définies (voir la figure 36).

Dans le domaine du développement logiciel; surtout dans le domaine de la transformation de modèles (Lemesle R., 1998), des applications à grande échelle (Vega G., 2005) et du développement d'architectures logicielles, (Manset D., et al., 2006) ont montré l'efficacité d'une approche basée sur les modèles. Ces approches ont été étudiées par la communauté relative à l'ingénierie dirigée par les modèles dite IDM (en anglais, MDE : Model Driven Engineering)

L'approche présentée dans la figure 36 peut être assimilé à celle de l'approche MDA (Model Driven Architecture) dite dirigée par les modèles parce qu'elle fournit les bases pour l'utilisation des modèles pour guider la compréhension, la conception, la construction, le déploiement, la maintenance et la modification des systèmes développés (Mellor S-J., et al, 2004). Les trois principaux objectifs du MDA sont la portabilité, l'interopérabilité et la réutilisabilité à travers la séparation des aspects dépendants de la plate-forme ou de l'application étudiée et des aspects plus abstraits indépendants de l'application. L'approche MDA se base sur quatre niveaux ontologiques (Naumenko A. and Wegmann A., 2003). Il s'agit du l'univers du discours, le modèle, le méta-modèle et le méta-méta modèle.

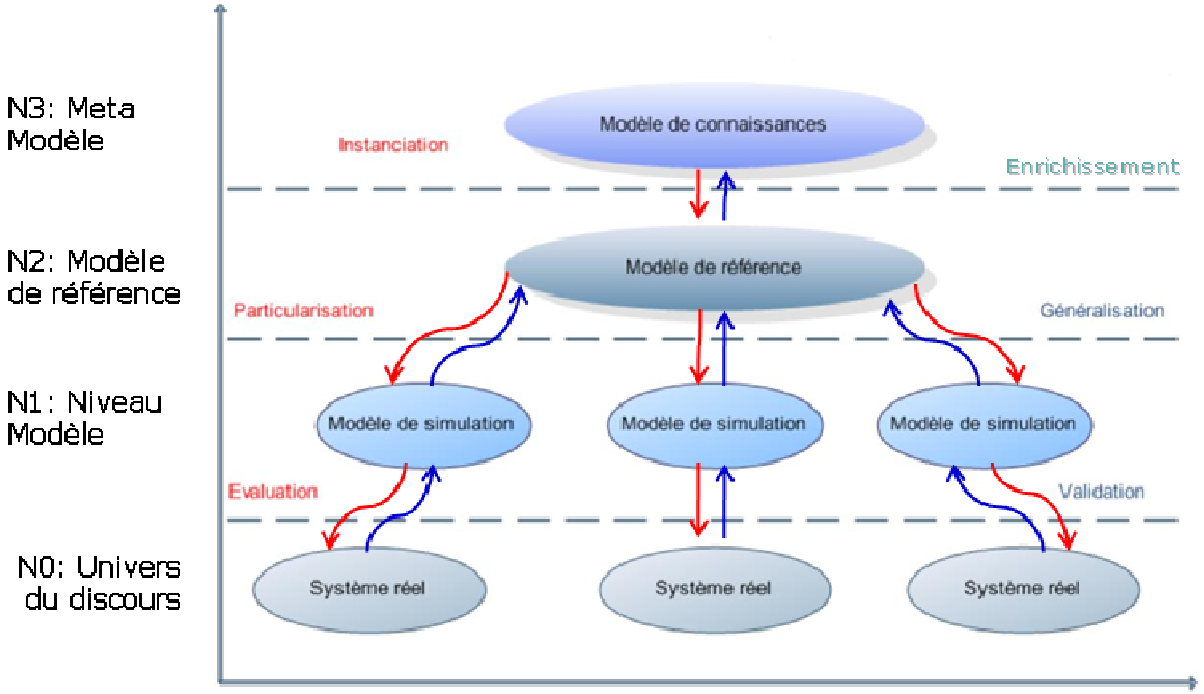


Figure 36 : Relations entre modèle de référence, modèle de simulation et système réel

La réutilisabilité, la portabilité et la généricité ne peuvent être assurée sans une modélisation modulaire du système réel et par le biais de la définition de composants ou modules génériques et par une différenciation des flux du système industriel.

Par ailleurs, le choix de séparer les modèles de pilotage des modèles du système opérant, d'une part, et le besoin dans le cadre de Hardware-in-the-loop, de tester le système de pilotage proposé dans son environnement (liens avec les différents systèmes d'information, interactions avec le modèle de l'émulation), d'autre part, posent le problème de synchronisation de ces différents modèles ou systèmes.

4.3 Interface de communication et synchronisation de modèles de simulation

Pour répondre aux problèmes de synchronisation plusieurs approches sont proposées :

- Le système de contrôle ne partageant pas l'Ordonnanceur d'événements du modèle de simulation à événements discrets, la simulation peut être exécuté en temps réel (c'est à dire que l'avancement du temps de la simulation se fait proportionnellement au temps de l'ordinateur). L'avancement du temps à événements discrets conduit à négliger les délais de prise de décision, puisque la simulation stoppe pendant la décision. Une solution basée sur l'hybridation entre temps réel et événements discrets a été proposée (Saint Germain B., et al, 2003). La

simulation avance par événements discrets, sauf lorsque le contrôle est actif, auquel cas l'avancement est en temps réel.

- Une autre piste est l'utilisation de HLA pour partager l'ordonnanceur d'événements de l'émulateur avec le système de contrôle externe. L'Architecture de Haut Niveau (High Level Architecture - HLA) est une spécification d'architecture logicielle (une norme) qui définit comment créé une simulation globale composée de simulations distribuées interagissant sans être recodées. Dans HLA, chaque simulation participante est appelée *fédéré*; elle interagit avec d'autres fédérés au sein d'une *fédération* HLA. L'ensemble des définitions relativesà HLA a donné lieu à la création de la norme 1.3 en 1996, qui a évolué vers une standardisation internationale du protocole (IEEE 1516).

5. CONCLUSION DU CHAPITRE 3

L'ensemble des problèmes mentionnés ci-dessus, à savoir le problème de la modélisation des exigences, la modélisation des SCP et l'évaluation d'un tel système dans son environnement, ont été soulevés afin de mettre en évidence les différents axes de recherche possibles. Nous pouvons synthétiser ces axes de recherche en une problématique scientifique, à savoir la nécessité d'une méthodologie de projet spécifique intégrant des mesures de pertinence et des fonctions de suivi des étapes du projet en utilisant, le système physique et/ou une « représentation » de ce dernier.

Pour répondre à cette problématique nous nous appuierons sur les travaux de plusieurs communautés scientifiques. D'une part, l'ingénierie systèmes (six-sigmas) et le génie informatique (UML) vont nous permettre de modéliser les « exigences clients » ainsi que le modèle de référence, sous la forme de modèles semi-formels, non quantifiables et non simulables. D'autre part, la communauté de la simulation à événements discrets pour l'utilisation des outils SED, va nous permettre de modéliser la dynamique du système et évaluer la pertinence du système de pilotage proposé.

Notre approche méthodologique doit, donc :

- proposer un guide de conduite de projet de conception et d'intégration d'un SCP,
- proposer une modélisation des exigences qui permette de générer un tableau de bord d'indicateurs de performance mesurables,
- permettre une modélisation, du système à concevoir, modulaire par le biais d'une approche systémique,
- proposer des éléments de modélisation adaptés aux systèmes pilotés par le produit dans le cadre de la DFT (ex : entité décisionnelle, éléments de communication –lecteurs-),
- utiliser un environnement de simulation automatisée pour répondre aux besoins de réutilisation et d'une utilisation simplifiée (industrielle),
- utiliser un environnement de simulation facilitant la distribution des modèles.

Dans le chapitre suivant, nous décrirons notre proposition en commençant par présenter les différentes étapes de la méthode (cycle de vie) et les différents outils utilisés.

IV Proposition de méthodologie de conception, validation et d'intégration des SCP

1. INTRODUCTION AU CHAPITRE 4

La mise en œuvre d'une approche méthodologique, dont la nécessité a été expliquée dans le chapitre précédent, passe par une première étape majeure: la définition d'un cycle de vie, ou des étapes, de la méthode. Ensuite et en s'appuyant sur les outils méthodes du génie logiciel, sur la méthode six-sigmas et sur les travaux déjà réalisés dans le domaine de la simulation, nous proposons une évolution des approches existantes pour qu'elles tiennent compte des objectifs précédemment cités.

Ainsi, notre approche méthodologique est basée sur un cycle de vie proposé par la méthode DFSS et composé de cinq phases principales (El Haouzi H., et al., 2008): define, measure, analyse, design, verify. Si la méthode six-sigmas conduit à proposer des indicateurs qualitatifs de performances, ses deux dernières phases de conception et de validation n'en permettent pas une mesure quantitative. Ainsi, pour combler ce manque nous avons été amenés à associer à cette méthode des techniques de simulation à événements discrets que nous avons adaptées au contexte particulier des SCP. Par ailleurs, et dans un souci de généricité, nous avons généralisé la construction de ces modèles de simulation en proposant un modèle de connaissances réutilisable, formalisé à l'aide de diagrammes UML à partir duquel seront instanciés tous les modèles de simulation. Cela a pour objectif, d'uniformiser ces modèles, de permettre d'automatiser les tâches redondantes et surtout permettre à des experts industriels ne maîtrisant pas les techniques de modélisation, de modéliser leur ligne d'assemblage facilement. Enfin le problème de l'intégration d'un SCP a montré que la méthode permettait, en particulier, d'appréhender la problématique des emplacements des lecteurs pour assurer la synchronisation des lignes d'assemblage et de leurs feeders (El Haouzi H., et al., 2008).

La figure 37 présente un guide de conception méthodologique générique ainsi que les outils que nous allons utiliser dans notre approche. Les phases « define »et « measure » sont focalisées sur la modélisation des exigences des clients au moyen d'un processus de raffinement. La phase « analyse » a pour objectif de définir le pilote et les fonctions principales d'un SCP en utilisant des outils comme la matrice de pondération (Pugh S., 1996) ou la maison de la qualité (issue du QFD : Quality Functions Deployment -méthode qualité dont l'objectif est d'assurer le déploiement des besoins clients tout au long du processus de conception et d'industrialisation d'un produit) (Zaîdi A., 1990).

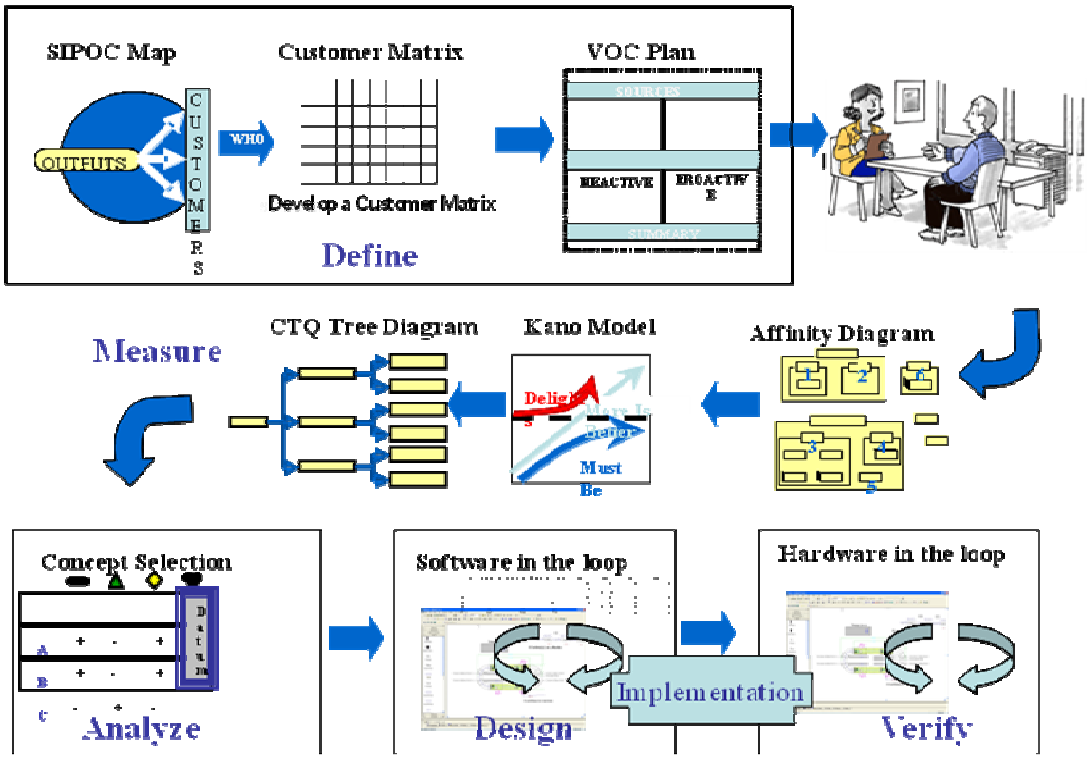


Figure 37 : Guide de conception et de validation des SCP

Les phases de conception (design) et de vérification (verify) sont fondamentales dans notre approche, elles correspondent respectivement aux étapes de « software–in-the-loop » et de « Hardware-in-the-loop » présentées précédemment. Elles seront basées sur la simulation pour, dans un premier temps, concevoir la solution SCP proposée et, dans un second temps et après implémentation, valider le système réel de contrôle en utilisant le principe de l'émulation. La phase design sera plus longuement développée car elle constitue le « cœur de la méthode ». En effet, nous devrons présenter en détail les étapes de celle-ci ainsi que les outillages nécessaires à la construction des modèles génériques de simulation.

Dans la suite du présent chapitre, nous décrivons ces différentes phases.

2. DEFINE

Rappelons que cette phase a pour objectif de spécifier les exigences attendues par le client du système à concevoir. Pour ce faire, divers outils et méthodes qualité sont intégrés dans la démarche six-sigmas, nous allons très brièvement présenter les étapes essentielles de cette phase et renvoyer le lecteur aux cas d'application et aux annexes pour plus de détails. Tout d'abord il s'agit de définir le cadre de l'étude, les enjeux, contraintes et invariants. Pour ce faire la méthode prévoit de sélectionner une équipe d'experts du domaine d'étude et de définir une charte qui précise les différentes missions du projet. A l'aide d'un outil nommé « diagramme SIPOC » (Annexe 1), il faut définir les fournisseurs, les entrées, les sorties et le processus concerné ainsi que ses clients. Enfin, il s'agit de définir les besoins exprimés par les

clients en utilisant la matrice du premier niveau du QFD, à savoir « la voix du client » (VOC) afin de mieux comprendre leurs exigences (appelées dans six-sigmas, Critical To Quality (CTQ)) (voir figure 38).

Le suivi de cette phase est assuré par trois personnes : un responsable de projet « green belt », un « black belt » dont le rôle est de s'assurer que la démarche six-sigmas est bien appliquée, et un « champion » qui vérifie la pertinence des solutions choisies au niveau métier.

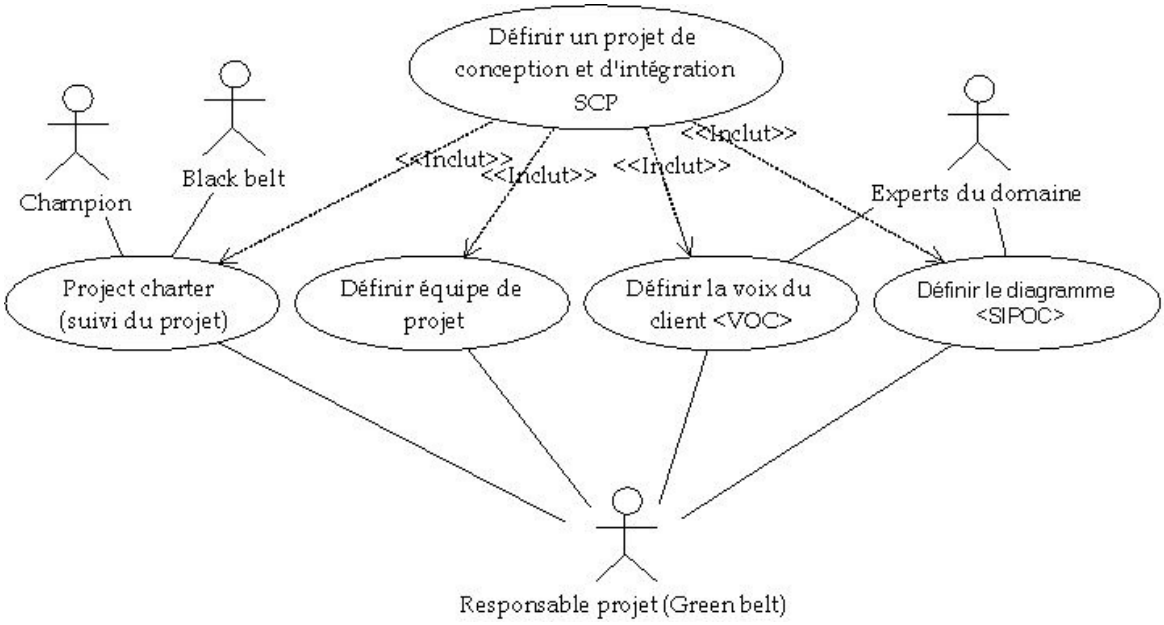


Figure 38 : diagramme de cas d'utilisation de la phase définir

3. MEASURE

L'objectif de cette étape est de traduire les exigences exprimées lors de la phase DEFINE (la voix du client et les CTQ) en métriques mesurables correspondant à ces CTQ. Tout d'abord, il s'agit de regrouper toutes les idées d'amélioration issues du « brainstorming » en sous-ensembles thématiques plus faciles à traiter. En conséquence, la complexité du projet sera réduite et le processus de modélisation sera simplifié.

Parmi la variété des outils pour atteindre cet objectif, le diagramme d'affinité (Affinity Diagram) (Annexe 2) rassemble une grande quantité de données linguistiques (idées, opinions et questions) et les organise en fonction de leurs relations naturelles dans des sous-ensembles.

Les sous-ensembles qui résultent du processus de regroupement des idées doivent être classés pour identifier les paramètres les plus critiques pour le client (figure 39). Pour ce faire, le modèle de Kano (Jacobs R., 1999) (Annexe 3) permet, en s'appuyant sur les attributs

(paramètres) des produits, de les classer en trois catégories d'importance par rapport à la satisfaction client (seuil = doit être, les performances = plus est mieux, et le meilleur = au delà des exigences). La dernière opération porte sur le raffinement des CTQ en utilisant le «CTQ Tree Diagram» (Annexe 4) pour passer des paramètres qualitatifs à des paramètres quantitatifs. En effet, comme nous l'avons expliqué précédemment, dans le cadre de nos travaux nous avons besoin de métriques mesurables pour conduire, via des scénarios de simulation, l'évaluation du système conçu.

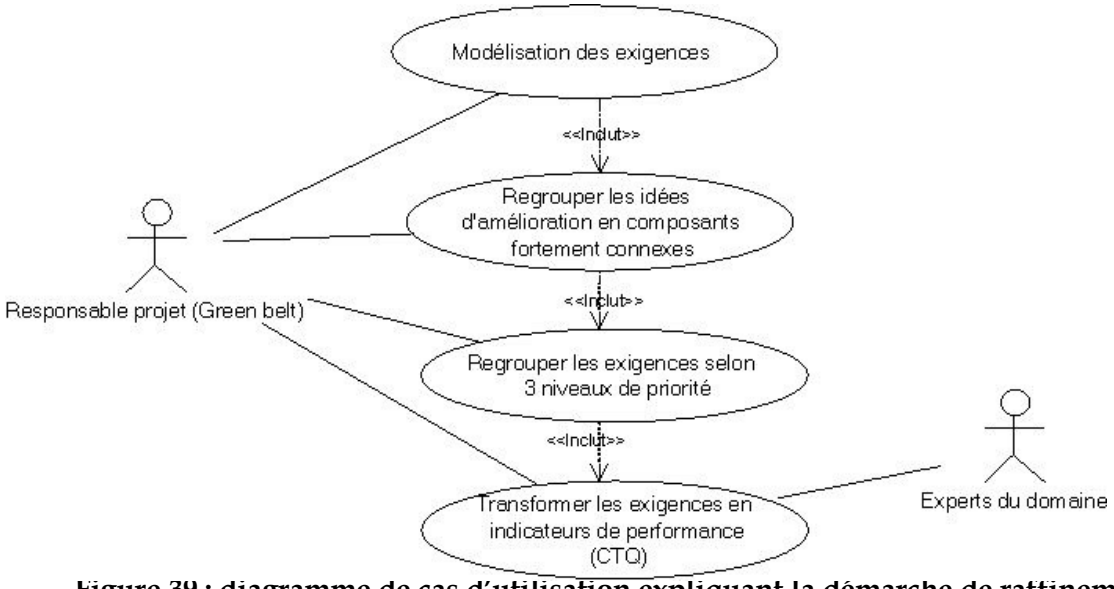


Figure 39 : diagramme de cas d'utilisation expliquant la démarche de raffinement des exigences

4. ANALYSE

Pour analyser les métriques (CTQ) issues de la phase « measure » afin de mettre en évidence celles qui seront primordiales et ainsi sélectionner le concept de solution (« piste » de solution) à mettre en avant, plusieurs outils sont proposés par l'approche six-sigmas. La matrice de pondération a été conçue pour comparer plusieurs options, par rapport à une option de base. Dans notre contexte, cet outil peut aider à sélectionner le pilote et un concept de mise en œuvre. La matrice du premier niveau du QFD (Quality Function Deployment, citée déjà) est utilisée pour traduire les besoins des clients en spécifications techniques. Elle permet aussi d'identifier les fonctions les plus importantes qui seront mises en œuvre dans le système de contrôle.

5. DESIGN (SOFTWARE IN THE LOOP)

Cette phase est le « cœur de la méthode », elle a pour objectif de concevoir un système de pilotage par le produit répondant aux besoins clients, identifiés dans les précédentes phases. Il s'agira, ensuite, d'évaluer les différentes solutions proposées par rapport aux métriques

établies (CTQ). Pour répondre à ce besoin d'évaluation nous utiliserons la simulation (SED) sous deux formes : la notion d'émulation du système physique et celle de simulation du système de contrôle, comme expliqué au chapitre 3.

Les modèles de simulation sont conçus à partir d'un ensemble de composants génériques, adaptables et réutilisables, compatibles avec diverses formes de systèmes de contrôle par le produit pour des entreprises en DFT. Dans un premier temps, nous présenterons les constituants élémentaires de nos modèles, puis dans un deuxième temps, la méthodologie de mise en œuvre par un modèle de connaissances.

5.1 Environnement de simulation dédié aux SCP :

Pour répondre aux différents problèmes introduits au chapitre 3, nous avons proposé de systématiser le processus de construction des modèles de simulation par instanciation d'un ensemble de composants de base (El Haouzi H., et al., 2008).

- des **composants physiques** modélisés sous la forme d'un réseau de files d'attente, caractérisant les processus de transformations dans l'espace (systèmes de transport), le temps (unités de stockage) et la forme (machines de fabrication ou d'assemblage) des flux de produits ; les attributs de ces entités concernent le délai de fonctionnement, la disponibilité des ressources, leurs capacités, …). (voir la figure 40). Ces composants forment le sous-système physique au sens de la vision systémique.

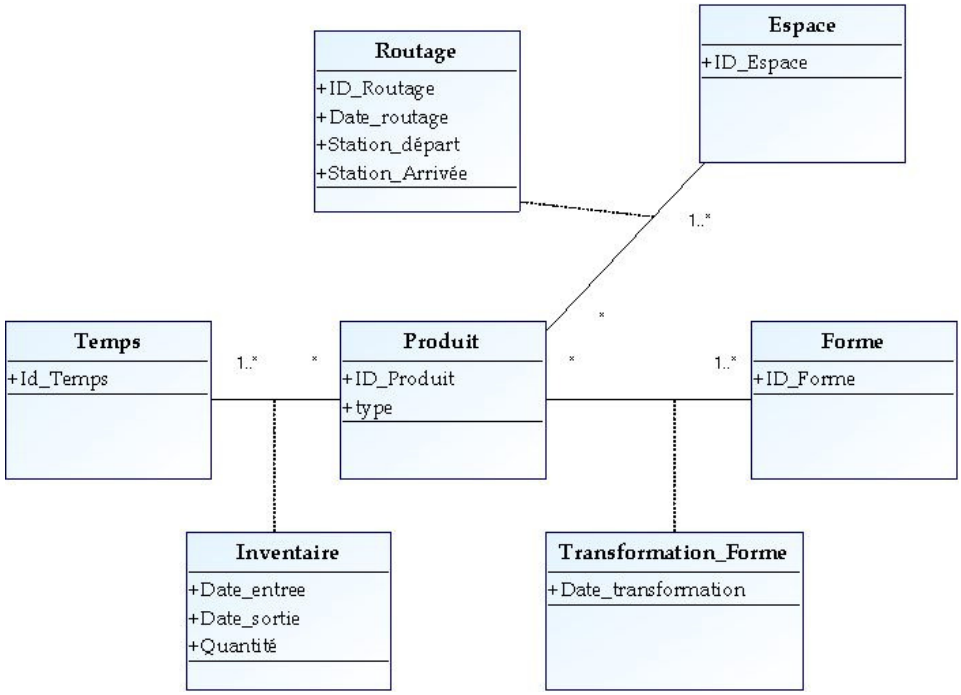


Figure 40 : Diagramme UML des composants physiques

- des **composants logiques** modélisés sous la forme d'heuristiques ou d'algorithmes représentant les décisions centralisées de pilotage fournies par les ERP ou les ordonnanceurs ; ces composants logiques permettent la création/lancement des produits ainsi que la réservation des composants physiques dans le réseau de files d'attente. Ces composants forment le sous-système décisionnel au sens de la vision systémique (figure 41).

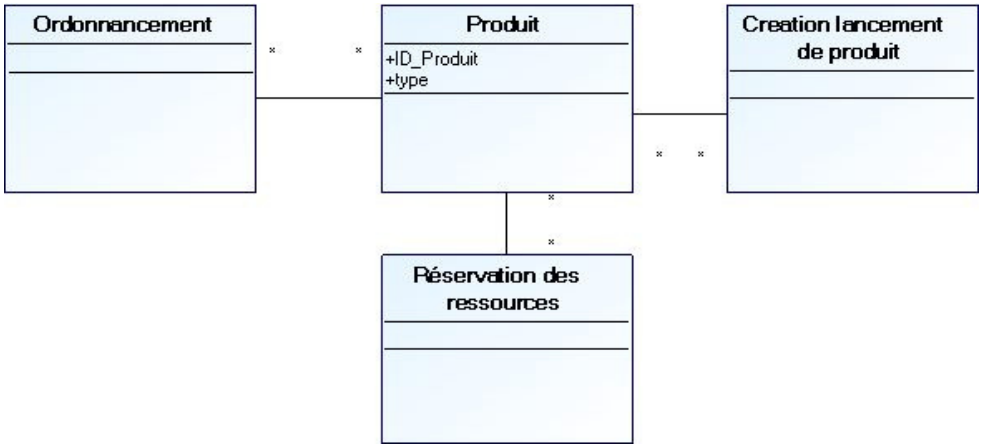


Figure 41 : Diagramme UML des composants logiques

- des **entités décisionnelles** (Trentesaux D., 2008) répondent aux objectifs mentionnés dans le chapitre 3 (réutilisation et modularité). Nous appelons entité décisionnelle tout élément du système physique amené à prendre des décisions distribuées. Chacune de celles-ci est donc composée d'une partie physique (ressources..) et une partie décisionnelle; la partie décisionnelle commande le physique selon le modèle comportemental. La figure 42 présente un méta modèle de ces entités.

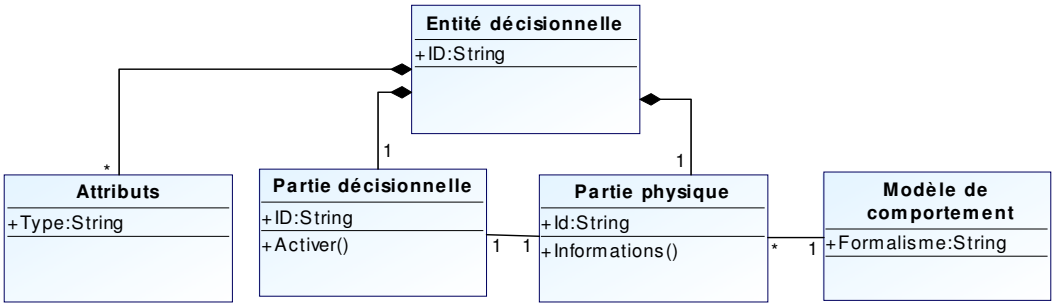


Figure 42 : Méta-modèle d'un composant décisionnel

- **Des composants informationnels** (figure 43) ; il s'agit de 3 types de composants intégrés dans une base de données. D'abord des composants techniques relatifs à la description des produits, puis des composants dynamiques, présentant un objet pour chaque élément du modèle d'émulation, et qui ont pour rôle de maintenir une image pertinente et cohérente de l'état du système de production et surtout améliorer la

visibilité terrain. Ces composants seront utilisés lors de l'initialisation de la simulation, et également mis à jour tout au long de l'exécution afin de suivre l'évolution du système. Le troisième type de composant concerne la traçabilité, ils permettent de mémoriser l'ensemble des événements de production, concernant tant les ressources que les produits, afin d'analyser a posteriori les différents « runs ».

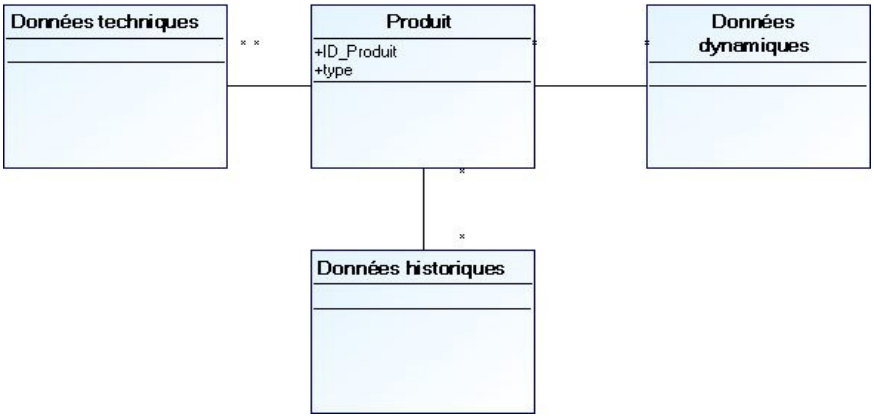
- 

Figure 43 : Diagramme UML des composants informationnels

Afin de simplifier la réutilisabilité, la généricité et l'interopérabilité, le système d'information basé sur ces composants (en particulier les données techniques et dynamiques) sera construit sur la base des spécifications B2MML et IEC 62264 (ISO/IEC62264, 2004)(figure 44).

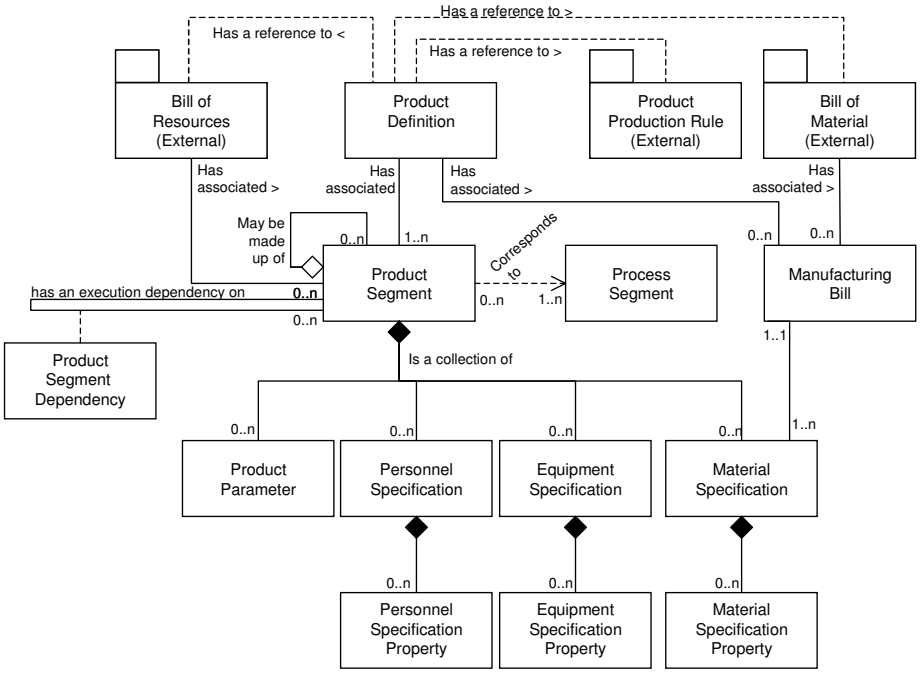


Figure 44 : Structure générique du système d'information (IEC 62264)

Notre plateforme de simulation est, donc, basée sur ces composants formant les 3 sous systèmes d'information, de décision et physique.

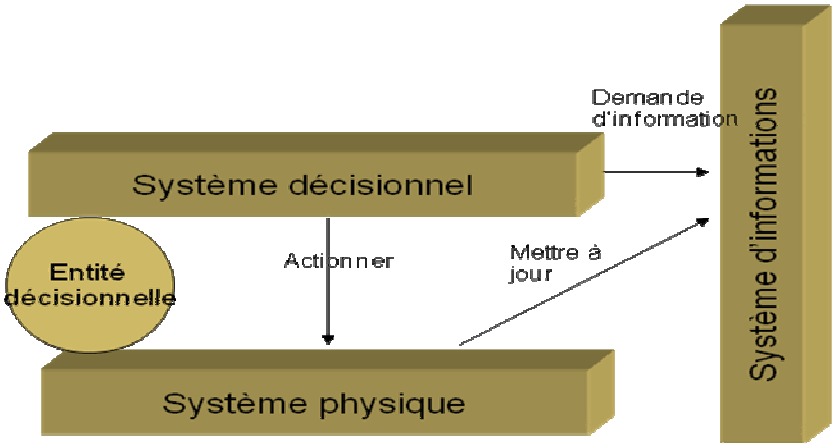


Figure 45 : la plateforme de simulation

La communication entre ces systèmes est mise en œuvre via des objets standardisés qui assurent l'interopérabilité. Le système est mis à jour en intégrant les modifications consécutives à une décision prise et en paramétrant le modèle d'émulation en conséquence (en particulier dans le cadre de Hardware in the loop où le modèle d'émulation du système physique doit communiquer avec des applications externes). Nous distinguons trois types d'événements :

- Les événements qui sont des messages **botton-up** en provenance du modèle d'émulation qui déclenchent une mise à jour du système d'information et si nécessaire un processus de prise de décision.

- Les actions, qui sont des messages **top-down**, sont le résultat d'un processus de prise de décision. Les messages d'action entraînent généralement un paramétrage des blocs ressources du modèle d'émulation, ou le réglage d'un bloc de routage. Une trame d'action contient l'identifiant de la ressource concernée ainsi que la procédure à exécuter et les éventuels paramètres.

- Les ordres de reprise, qui signifient la fin du processus de décision et autorisent la reprise de l'exécution de la simulation.

La procédure de synchronisation entre l'émulation du système physique et la simulation de son contrôle (figure 45) est la suivante : lorsqu'une entité atteint un point de synchronisation, un message événement est envoyé au système d'information, portant l'identifiant de l'entité et du point de synchronisation. Le système d'information transmet les changements au système de pilotage qui, si nécessaire, déclenche une procédure de décision.

Le modèle d'émulation est mis en pause pendant la durée de cet échange, et l'entité est retenue dans le bloc de synchronisation, jusqu'à réception d'un ordre de reprise.

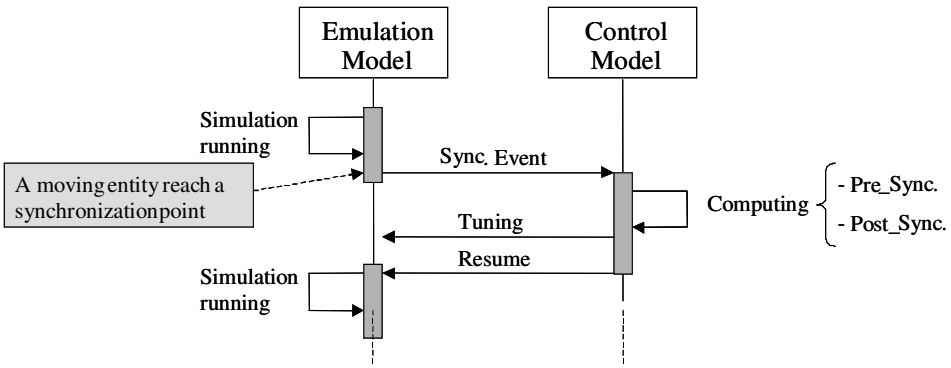


Figure 46 : La procédure de synchronisation

5.2 *Méthodologie de mise en œuvre des modèles de simulation*

5.2.1 *Principe de mise en œuvre*

Cette étape s'appuie sur une évolution de la méthode ASCI que nous avons proposée dans (El Haouzi H.,et al., 2008) et que nous avons appelée ASCI-Ph (Ph comme pilotage hybride – Figure 47). Dans celle-ci, nous proposons de distinguer deux niveaux d'abstraction: les niveaux d'analyse et d'implémentation. Chacun de ces niveaux se compose de deux parties principales: la première concerne le domaine du système et la seconde s'intéresse à un système de ce domaine. Dans les paragraphes suivants nous allons décrire les deux niveaux d'abstraction (analyse et implémentation).

5.2.1.1 Niveau Analyse

Le but de la phase d'analyse du domaine est de formaliser un modèle de connaissances du système de production qui soit à la fois générique et orienté-objet. Ce modèle est constitué de 4 modèles : le modèle du sous-système physique SSP, du sous système informationnel SSI, du sous système décisionnel SSD et le modèle des entités décisionnelles (voir figure 47).

La seconde étape est la spécification, elle consiste, à décrire les fonctions et le modèle comportemental des entités du système. En effet, il faut décrire le modèle de comportement des entités décisionnelles pour faciliter leur implantation grâce à des diagrammes de séquences ou des formalismes mathématiques réseaux de pétri, matrices, automates...

Dans l'étape d'analyse d'un système du domaine, les experts emploient le modèle de connaissances pour analyser et spécifier leur système industriel. Ce modèle de référence peut être adapté au système particulier en indiquant les fonctionnalités de certains composants du système et en y ajoutant des attributs.

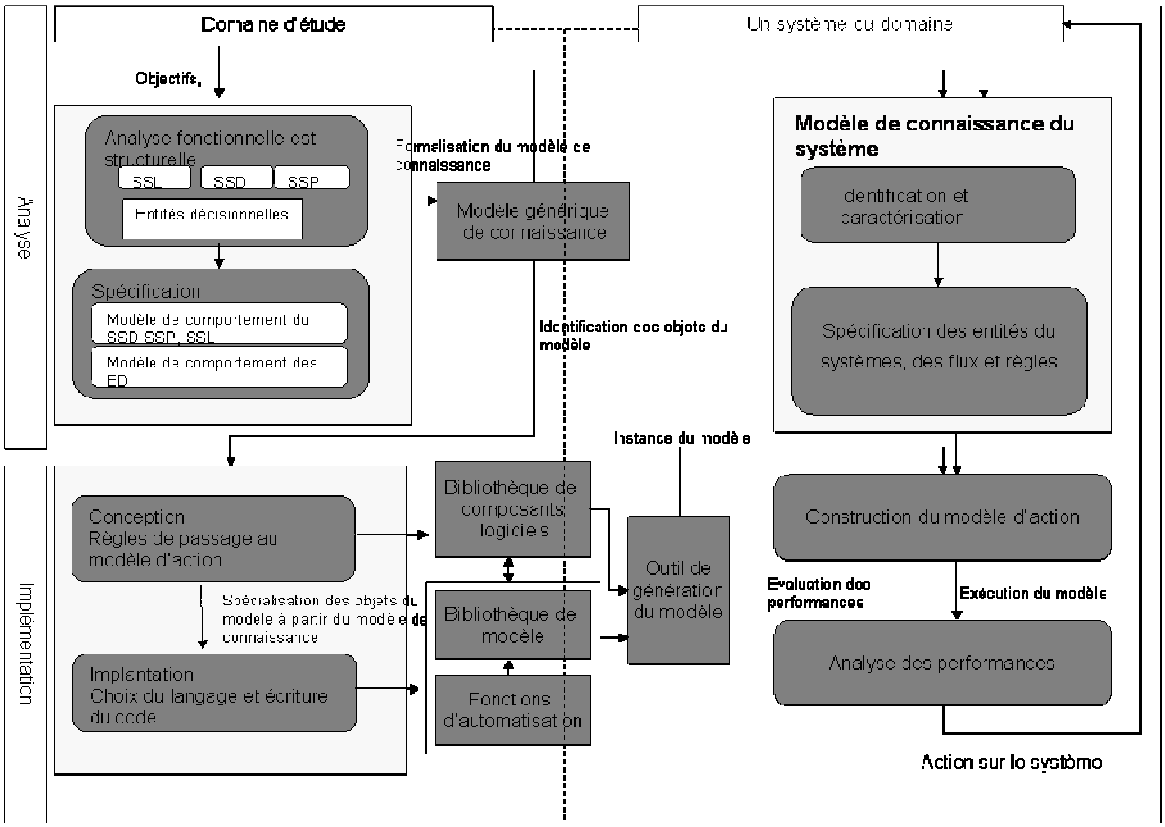


Figure 47 : Cycle de vie ASCI-Ph (IJPE)

5.2.1.2 Niveau Implémentation

Dans la phase de conception et implémentation du domaine d'étude, nous définissons des règles pour établir des modèles d'action ou des composants de base; cette étape est très importante pour la réutilisabilité. La phase d'implémentation conduit à la construction d'une bibliothèque de composants utilisés pour construire un modèle pour un système de la classe étudiée. Dans cette même phase nous construisons un composant générique pour représenter des entités décisionnelles et nous implémentons des fonctions d'automatisation des créations du modèle. Au niveau du système, à partir du modèle générique et de la bibliothèque de composants construits dans la phase implémentation du domaine, nous pouvons construire le modèle d'action d'un système particulier.

5.2.2 Application dans le cadre de la DFT

Pour répondre à tous ces objectifs nous avons mis en œuvre trois outils de développement relatifs aux trois sous systèmes: physique, informationnel et décisionnel.

5.2.2.1 La phase d'analyse

La phase d'analyse a conduit à trois diagrammes de classe. Diagramme du sous système physique où l'on trouve les différents objets de la DFT. Comme élément principal nous trouvons la ligne d'assemblage, composée d'un ou plusieurs de postes de charge. Un poste

de charge est composé d'un ou plusieurs postes de travail, alimentés par un ou plusieurs feeders (voir figure 48).

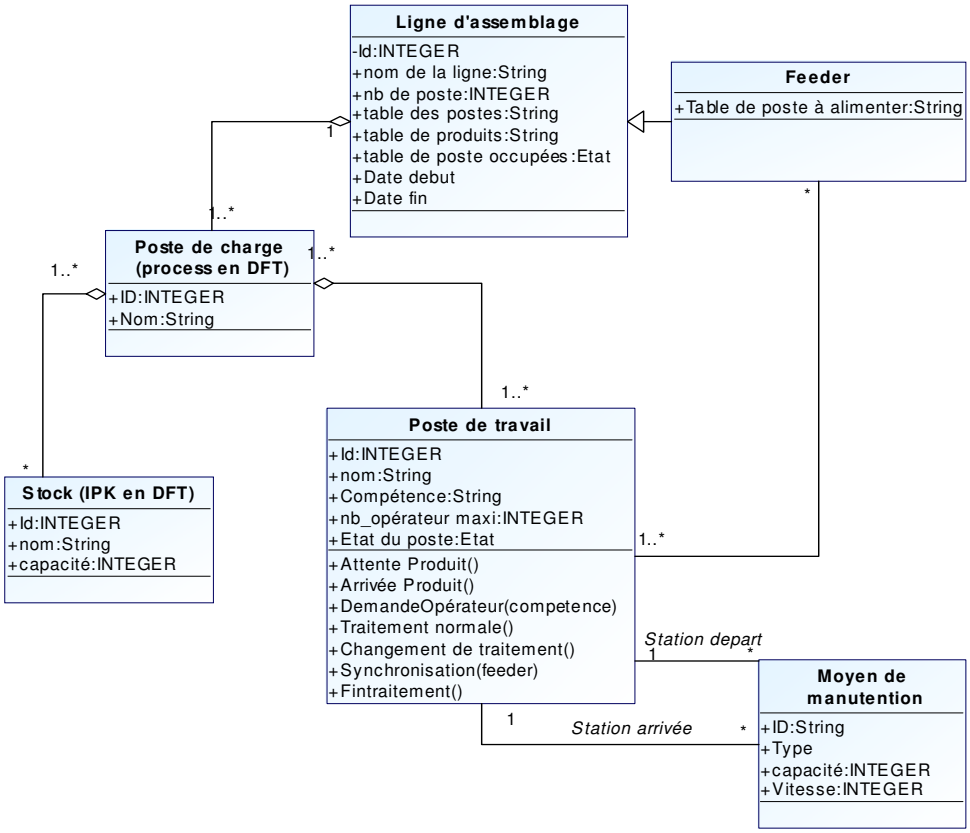


Figure 48 : Diagramme de classe du sous-système physique

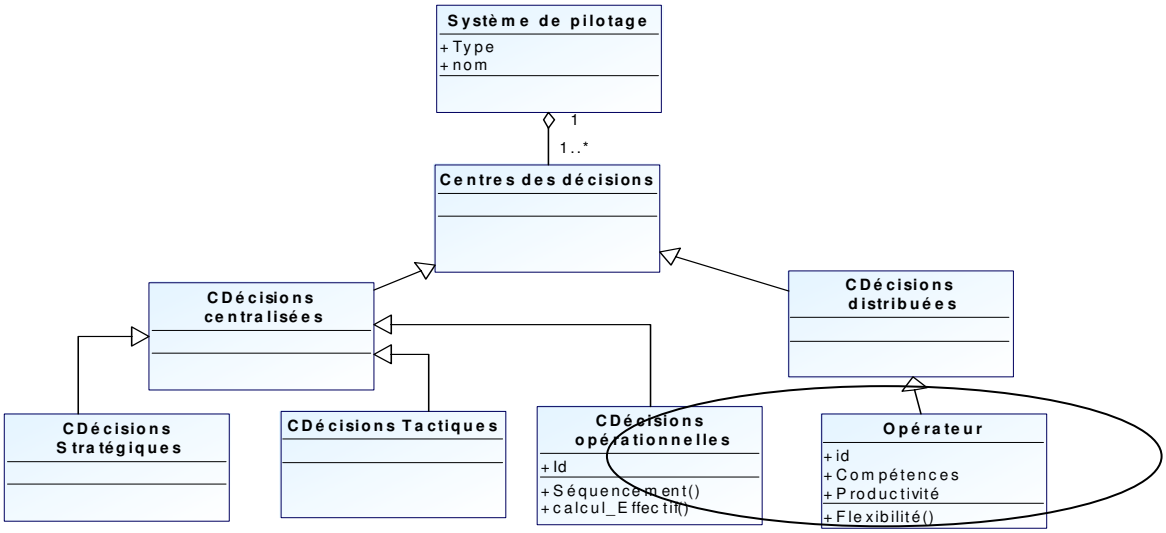


Figure 49 : Diagramme de classe du sous système décisionnel

Le sous système de décision est composé de deux types de centres de décision (centralisés et distribués). Les centres de décisions centralisées concernent les trois niveaux : stratégique, tactique, et opérationnel. Dans cette étude nous nous sommes limités au dernier niveau, et aux centres de décisions distribuées représentant les opérateurs (voir figure 49).

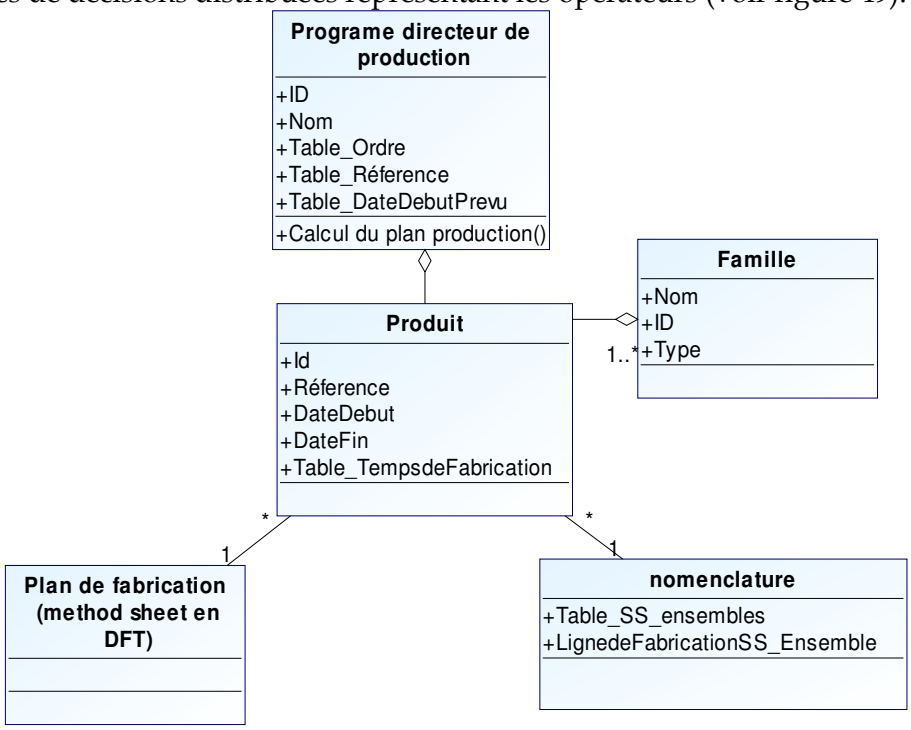


Figure 50 : Diagramme de classe du sous système informationnel

Le sous-système informationnel concerne le produit. Il décrit les éléments le spécifiant et caractérisant son flux : sa gamme, sa nomenclature, le programme directeur de production qui contient les informations sur le nombre de produits à fabriquer pour une période déterminée, l'ordre du passage, la date du début de fabrication de chaque produit (ce diagramme se limite à la partie données techniques, les données techniques et historiques sont développées selon le système étudié (figure 50)).

5.2.2.2 Phase implémentation

Dans cette partie nous expliquons les outils utilisés pour la mise en œuvre du modèle d'action.

Pour le sous-système physique, nous nous sommes intéressés aux logiciels de simulation utilisant une approche orientée objet pour plusieurs raisons. D'une part, cette approche permet de garder une cohérence entre toutes les étapes de la construction des modèles de simulation (le modèle de connaissance en UML de la phase de l'analyse, par exemple, sera facilement exploité pour la construction du modèle d'action). D'autre part, cette approche permet d'identifier chaque objet du système réel avec un objet du modèle (Anglania A., et al.,

2002). Plusieurs logiciels du commerce existent (ARENA, AUROMOD, AUTOSTIMULATION, MODELICA, WITNESS). Le choix s'est porté sur ARENA, très utilisé dans le domaine industriel et académique (Al-Ahmari A.M.A. and Ridgway K. , 1999) (De Swaan Arons H. et al., 2001) (Ernani Vieira G., 2004).

- Le principe de ces logiciels est de générer un ou plusieurs flux d'entités discrètes, qui peuvent représenter des flux d'informations ou des flux physiques. Ces entités générées vont circuler dans un modèle composé de différents modules, lesquels auront une influence sur la vitesse du flux, sa nature ou son cheminement au sein du modèle. Le logiciel ARENA a, par ailleurs, deux propriétés intéressantes: une interface VBA pour communiquer avec d'autres logiciels, un module « ARENA professionnel » qui offre la possibilité de créer sa propre bibliothèque regroupant des composants paramétrables et donc permettant d'encapsuler les données de certaines parties du modèle ARENA (garantir la réutilisabilité).

- Pour le sous système informationnel, nous avons utilisé EXCEL et une base ORACLE pour stocker les informations nécessaires au modèle ARENA (nombre d'opérateurs, compétences sur les postes, produits à fabriquer..) et récupérer la charge de travail à réaliser.

- Le sous système décisionnel, compte tenu des propriétés d'ARENA citées précédemment, est développé en VBA/VB.net. L'interface VBA servira aussi à la construction de la plateforme de simulation (EXCEL, ARENA) automatiquement grâce à des macros dans les deux logiciels.

5.2.3 La prise en compte des concepts de réutilisabilité et de modularité

5.2.3.1 Introduction

La réutilisabilité et la modularité sont assurées en plusieurs étapes : Au niveau du domaine de l'étude, par le développement des composants génériques et, au niveau d'un système de ce domaine, par l'automatisation de la création des modèles (modèle de simulation sur ARENA et le modèle d'information. Plusieurs composants ont été développés : un composant générique pour le comportement de l'opérateur, un composant « IPK », un composant « gestion des ordres de fabrication », un composant « poste de travail » etc.. Nous présentons ici le composant générique « poste de travail » qui nous servira à illustrer le mécanisme de synchronisation dans le paragraphe suivant.

5.2.3.2 Poste de travail

L'interface de l'objet « poste de travail » (figure 51) permet de renseigner les paramètres : nom du poste, la compétence nécessaire pour travailler sur ce poste, le temps de travail qui est un attribut de l'unité passant sur ce poste, nombre d'opérateurs maxi sur le poste, on

ajoute à ces paramètres des options comme par exemple : le poste est-il au début de ligne ou en fin de ligne ? Le poste est-il rattaché à un feeder ou pas ?…etc.

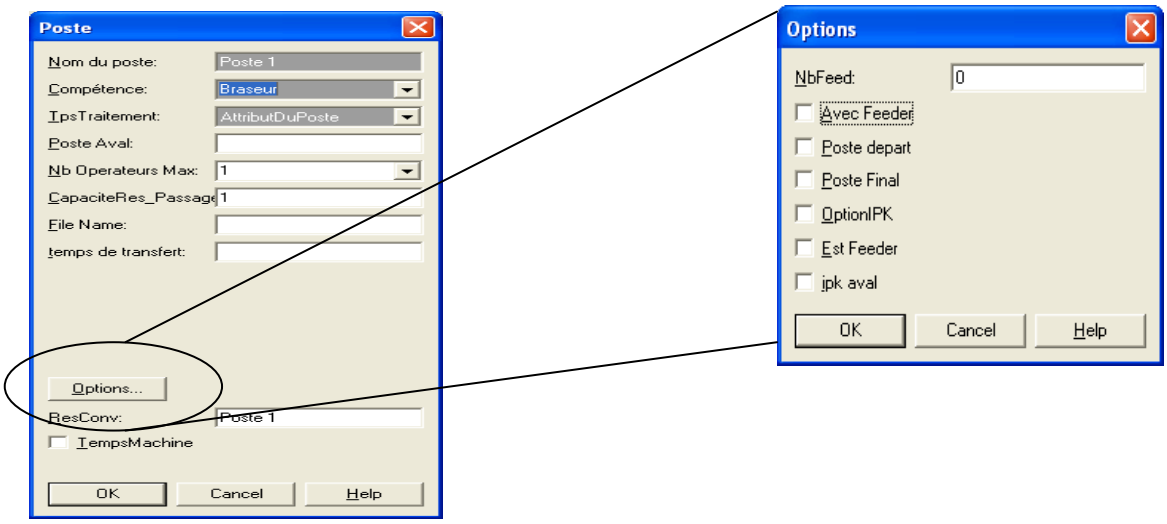


Figure 51 : Poste de travail dans ARENA

Au niveau d'implémentation deux flux cœxistent (figure 52): un flux physique où les entités correspondent aux produits à fabriquer et un flux logique avec des entités neutres qui permettent d'effectuer divers traitements en fonction des variables d'environnement et du flux physique. Cette boucle représente les décisions distribuées prisent localement sur le poste du fait de la DFT, de par la flexibilité des opérateurs et une gestion favorisant le pilotage par le produit. La figure suivante décrit le fonctionnement d'un poste de travail:

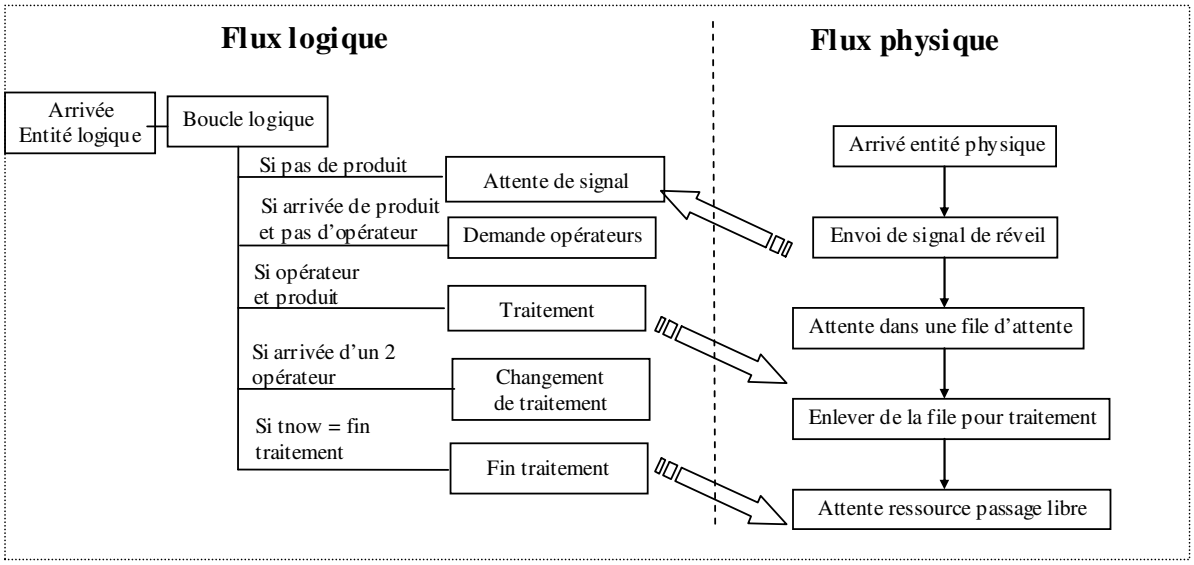


Figure 52 : Fonctionnement d'un poste de travail

L'entité logique va commencer le traitement sur le poste de travail si nous avons un opérateur et un produit en attente de traitement. Si un deuxième opérateur arrive et que le temps du traitement restant est inférieur à une valeur minimale x (x étant un paramètre à saisir) alors l'opérateur n'est pas autorisé à travailler sur le poste dans le cas contraire en effectue un « changement de traitement » : le deuxième opérateur sera à l'état occupé est le temps sera divisé par 2.

5.2.3.3 Opérateurs

L'opérateur est un élément essentiel dans notre modèle. Un opérateur est caractérisé par son nom et ses compétences (voir figure 53)

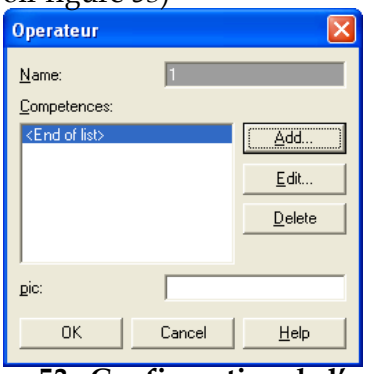


Figure 53 : Configuration de l'opérateur

Chaque opérateur a deux parties : d'une part, une partie physique matérialisée par une entité qui peut être soit libre, soit en travail. Elle est libre quand l'entité est dans la file d'attente de la « gestion opérateur » et occupée quand elle est dans la file d'attente « travail » d'un poste de travail sur la ligne d'assemblage et d'autre part, la partie logique permet d'exécuter les traitements (réserver la partie physique...)

Pour répondre aux besoins d'un poste de travail, un signal est envoyé, d'abord, par le composant « gestion opérateurs » (coordonnateur). Celui-ci est composé de deux parties : une partie physique matérialisée par une file d'attente où attendent les opérateurs libres et une partie logique qui envoi le signal aux différents opérateurs en fonction du premier opérateur libre.

Ensuite chaque opérateur recevant le signal commence sa boucle logique. Il compare la compétence demandée avec ses propres compétences : s'il a la compétence requise, l'entité physique est enlevée de la file d'attente gestion des opérateurs et envoyée à la file d'attente traitement du poste de travail. Sinon l'entité physique reste en position libre est le signal est renvoyé à la gestion des opérateurs. (Voir figure 54)

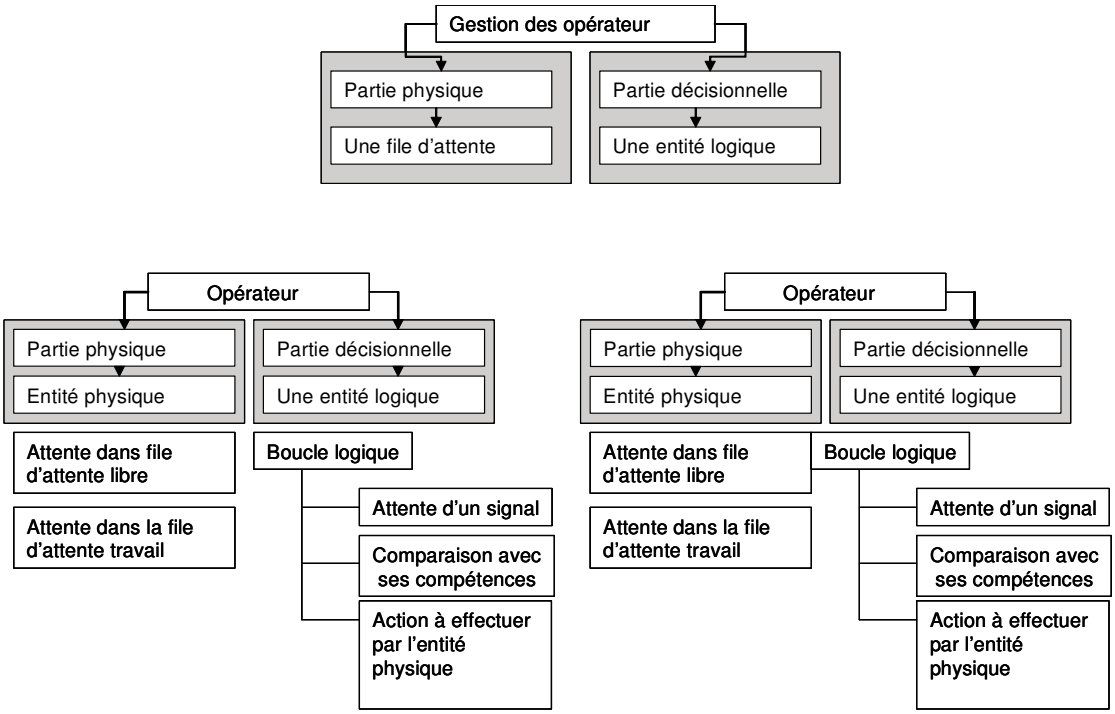


Figure 54 : Comportement d'un opérateur

5.2.3.4 L'automatisation de la création des modèles

Comme nous l'avons mentionné dans l'introduction de ce chapitre, l'objectif de l'automatisation de la création des modèles de simulation et de leurs environnements est d'uniformiser ces modèles, d'automatiser les tâches redondantes et surtout permettre à des experts industriels ne maîtrisant pas les techniques de modélisation, de modéliser leur ligne d'assemblage.

Nous avons créé une application en vb.net capable d'instancier un modèle ARENA et un modèle d'information sous EXCEL (Voir le diagramme de classe en annexe 7).

Le diagramme de séquence de la figure 55 présente, d'une façon macroscopique, la création d'un environnement de simulation (EXCEL, ARENA). La première étape conduit à une instanciation d'un modèle ARENA et un classeur EXCEL. Ensuite, l'étape suivante consiste à remplir les champs de plusieurs interfaces graphiques (nombre de lignes d'assemblage d'un modèle, les paramètres des postes de travail des lignes concernées). Une fois que les lignes sont modélisées, le fichier EXCEL est mis à jour. Les feeders sont créés de la même façon que les lignes. La dernière étape consiste à remplir les informations des produits dans EXCEL (les temps de travail sur chaque poste, type..), puis à générer un PDP et pour enfin lancer la simulation.

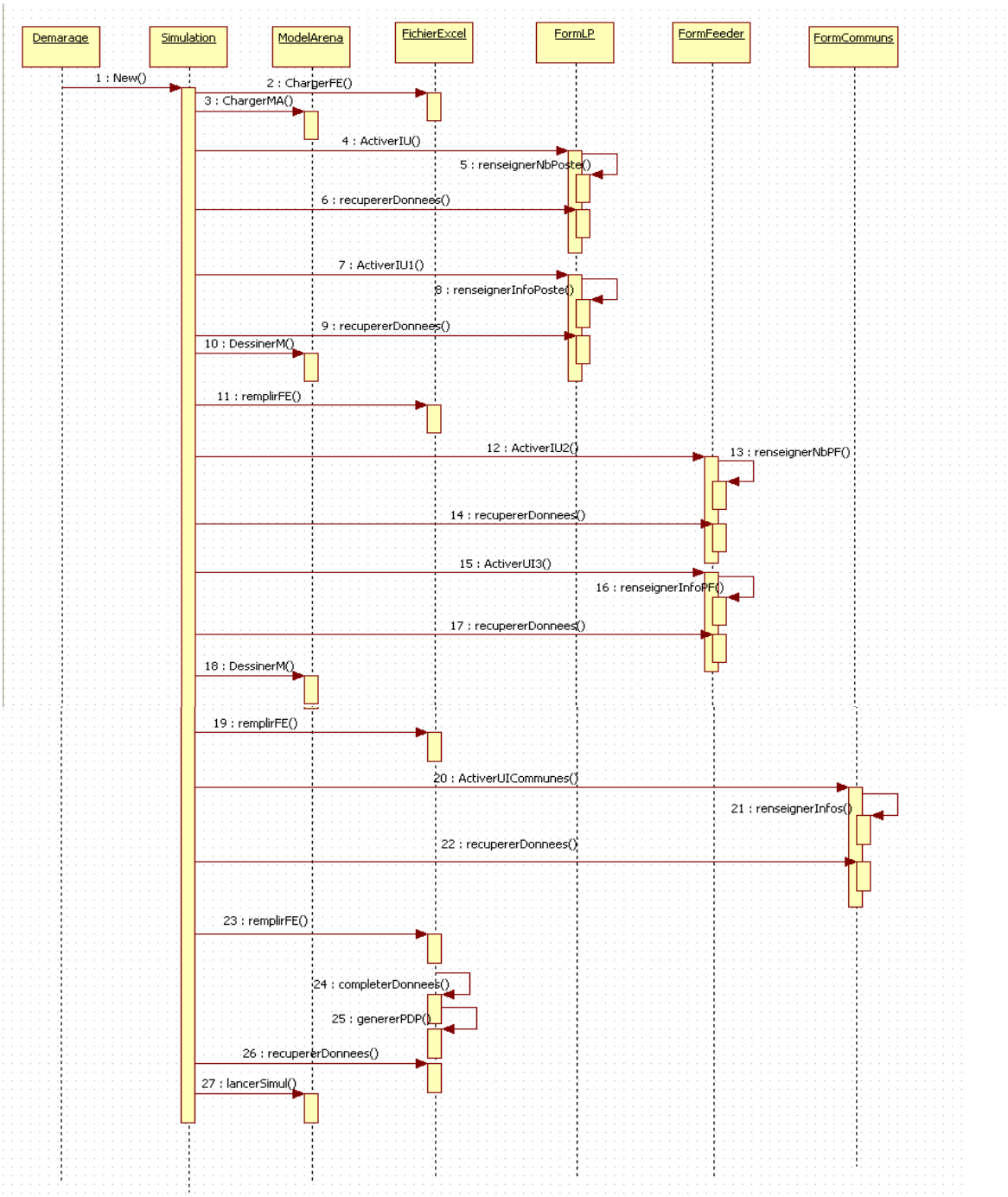


Figure 55 : diagramme de séquence de la création d'un environnement de simulation

5.2.4 *Synchronisation d'une ligne et de ses feeders*

La synchronisation entre une ligne et ses feeders se fait grâce à des signaux, pour éviter toute rupture, un emplacement IPK est prévu entre la ligne et le feeder, la capacité de cet emplacement est variable (de 1 à n).

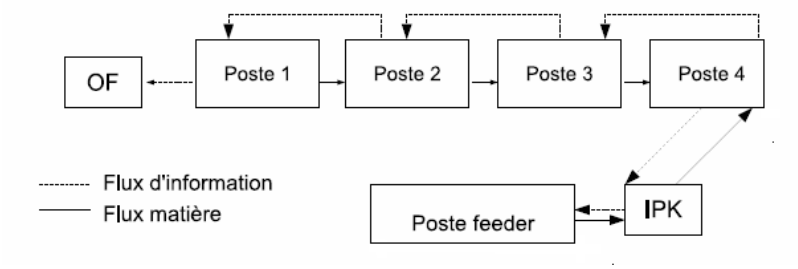


Figure 56 : Mécanisme de synchronisation

Le fonctionnement de cette synchronisation est le suivant: trois composants interagissent pour assurer la synchronisation : le poste de la ligne à alimenter (figure 56) (le Poste 4 qui est un poste de travail avec option feeder voir paragraphe 5.4.2), un emplacement IPK et le poste directement en amont de cet IPK (Poste Feeder). Nous commençons d'abord par décrire le comportement du poste de la ligne à alimenter.

5.2.4.1 Poste de la ligne à alimenter

Le flux logique suit le même cheminement qu'un poste normal (même traitement) par contre le flux physique suivra le cheminement suivant:

```
Si (Arrivée entité physique) alors
            Envoi (signal S_IPK) // besoin d'un composant
            Attente  (signal S_ArrC) // attente du composant
Si (Arrivée composant) alors
          Envoi (signal S_ArrC) // réveil entité logique
          Regroupement (composant, entité physique)
          Attente (traitement).
 Fin si
```

5.2.4.2 Composant « IPK »

L'IPK a deux éléments essentiels, une file d'attente où nous stockons les composants selon la capacité (PlaceIPK_libre) et une file d'attente des demandes du poste aval.

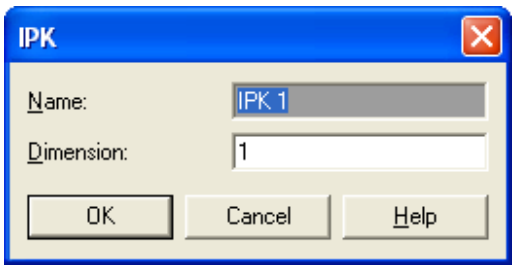


Figure 57 : Interface du composant IPK

A chaque événement nous comparons les entités des deux files. Le traitement sur ce composant suit le cheminement suivant :

```
Si Arrivée (composant) alors
  Attente (signal S_IPK) (une demande du poste aval : besoin de composant)
          Comparer (signal S_IPK, composant dans la file d'attente) //si oui
          Libérer (composant)
               PlaceIPK_libre =  PlaceIPK_libre +1
Fin si
```

5.2.4.3 Poste en amont de l'IPK (feeder)

À ce poste, encore une fois, il n'y a pas de changement au niveau flux logique mais au niveau flux physique à la place « d'attente ressource passage libre » on attend que PlaceIPK_libre > 0. Puisque sur ce poste nous pouvons libérer plus qu'une entité à la fois, selon la capacité de l'IPK.

5.2.5 Synthèse

Un schéma résumant la mise en œuvre des méthodes et outillages proposés se trouve en annexe 5. Il décrit les diverses techniques utiles pour générer des objets, et des modèles.

Tous les cas d'application de la méthode ne nécessiteront pas d'utiliser tous les outillages proposés. En effet, cela dépend de la nature des problèmes étudiés (synchronisation physique /informations ou physique/physique), il dépend aussi du système physique (est-ce que le système existe ou pas ?).

6. IMPLEMENTATION DES SYSTEMES CONTROLES PAR LE PRODUIT :

Le problème de conception d'un SCP est d'identifier par qui, quand et où les informations du produit et les événements du système physique peuvent contribuer à améliorer la performance d'indicateurs donnés par les CTQ. Les modèles de simulation offrent la possibilité de simuler les interactions entre le contrôle, le produit et ses informations ou les événements des processus physiques et, par conséquent, évaluer les scénarios des différentes architectures de pilotage.

Différentes approches tirées du génie informatique (distribuées) peuvent être utilisées pour implémenter un système SCP. Les paragraphes suivants proposent une étude de deux approches les plus utilisées.

6.1.1 Multi-agents :

Les recherches en systèmes multi-agents (SMA) étudient la manière de répartir un problème sur un certain nombre d'entités coopérantes. Elles étudient aussi la manière de coordonner le comportement intelligent d'un ensemble d'entités selon des lois sociales. Ces entités ou agents sont autonomes et interagissent dans un environnement pour la résolution de problème.

Les technologies multi-agents sont particulièrement adaptées à l'étude du pilotage par le produit, dans la mesure où elles permettent de tenir compte du fort parallélisme de l'exécution de ces systèmes ; elles forcent aussi à une formulation explicite des transferts d'information entre agents, et permettent d'ailleurs l'analyse de ces échanges. Cependant,

malgré l'existence des kits de développement comme par exemple la bibliothèque JADE [3] la mise au point d'un système multi-agents reste difficile et requiert une forte spécialisation.

6.1.2 *Applications web :*

Aujourd'hui, la plupart des systèmes d'informations (ERP : ORACLE, MES : FLEXNET…) utilisent des applications web [4]. Ces applications sont basées sur un modèle logique d'architecture applicative communément appelé architecture 3 tiers. Celui-ci, vise à séparer très nettement trois couches logicielles (ou niveaux) au sein d'une même application :

La présentation des données (Niveau 1) : correspondant à l'affichage, la restitution des données sur le poste de travail, le dialogue avec l'utilisateur ;

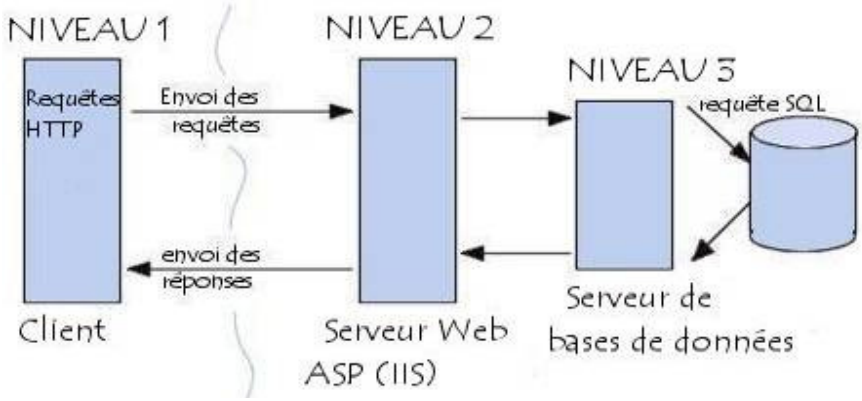


Figure 58 : Le modèle logique d'architecture 3-tiers

Le traitement métier des données (Niveau 2) : correspondant à la mise en œuvre de l'ensemble des règles de gestion et de la logique applicative ; et enfin l'accès aux données persistantes (Niveau 3): correspondant aux données qui sont destinées à être gardées sur une longue durée. Ce type d'application offre plusieurs avantages :

- Les applications web génèrent dynamiquement des pages web dans un format compatible avec la plupart des navigateurs web (HTML/XHTML). Les scripts

3 JADE implémente les normes de la FIPA23. Ces normes définissent de très nombreux aspects du fonctionnement d'un système multi-agents, y compris le cycle de vie des agents, la syntaxe utilisée pour les messages de communication inter-agents (ACL – Agent Communication Language), les protocoles d'interactions dans lesquels s'inscrivent

4 une application web est une application réseau basé sur un serveur et un client dont la communication est basé sur l'appel de liens).

clients, notamment en JavaScript, sont souvent utilisés pour ajouter des éléments dynamiques à l'application.

- L'application est plus facilement maintenable, puisque les mises à jour ne se font que sur le serveur et non pas sur chaque poste client.
- Une évolutivité aisée des applications, vu qu'il n'est pas nécessaire de les déployer sur les postes clients.
- De la possibilité d'accès distant.
- Compatibilité avec différents systèmes d'exploitation : Windows, Mac OS, Linux, Pocket PC ou téléphone mobile.

Par ailleurs, l'avancée apportée par le Web 2.0 et AJAX permet d'étendre les possibilités de visualisation et d'interactivité des applications.

7. VERIFY (HARDWARE IN THE LOOP)

Le résultat du processus de modélisation proposé aboutit à un ensemble de modèles hétérogènes (réseaux de files d'attente, modèles logiques). Leur synchronisation repose sur une exécution alternative des modèles, ce qui revient à stopper l'écoulement du temps dans le réseau de files d'attente pendant la durée d'exécution des modèles logiques. Ces mécanismes sont supportés par les entités physiques/logiques et donnent naissance à des échanges de messages entre **décisions locales** et **décisions centralisées** qui représentent le contrôle par le produit sur le pilotage de la production.

En effet, pour qu'un système de contrôle externe puisse interagir avec le modèle d'émulation du système opérant (plus particulièrement mode Hardware-in-the-loop), ce dernier doit pouvoir recevoir des commandes et renvoyer les événements de l'émulation.

Le logiciel ARENA propose une ouverture vers des applications externes ce qui permet d'assurer les communications avec la couche de pilotage. Cet outil intègre en effet la technologie WINSOCKET, utilisée pour échanger des messages avec l'application web.

Pour permettre la communication entre l'application web et le modèle de simulation, nous avons défini un objet « XMLHTTPREQUEST » et un objet de simulation facilitateur Ces deux objets possèdent la technologie WINSOCKET pour communiquer par TCP/IP. Ce client et cet objet ont donc pour unique fonction la communication entre chaque les pages et leur objet de simulation, correspondant à la partie physique.

8. CONCLUSION DU CHAPITRE 4

Ce chapitre a présenté notre proposition méthodologique et les outillages nécessaires à la construction des modèles génériques à instancier à chacun des cas d'application. Notre méthode pallie bien aux lacunes mises en évidence dans le chapitre 3, à savoir le manque de méthodologie de suivi par indicateurs de performance de toutes les étapes du projet, la validation du système de pilotage développé dans un environnement distribué et hétérogène et enfin de montrer la pertinence d'un SCP à l'échelle industrielle.

Le chapitre suivant montrera plusieurs cas d'application de l'entreprise TRANE. Cela a pour objectifs de parfaire la validation de notre méthodologie ainsi que de couvrir le maximum de problèmes de synchronisation dans les différents modèles de gestion pratiqués dans l'entreprise.

V Validation sur deux modes de gestion :

INTRODUCTION AU CHAPITRE 5

Conscient que la construction d'une méthodologie est un travail de longue haleine et qu'il n'existe pas de méthodes formelles de validation, nous avons fait le choix d'une démarche itérative et incrémentale de validation.

En effet, l'aspect itératif est rendu nécessaire par le fait que la validation d'une méthode qui se veut générique nécessite plusieurs applications, d'une part, et que les choix de celles-ci doivent couvrir les différents aspects et échelles du problème industriel, d'autre part. En particulier, nous avons choisi de mettre d'abord en œuvre un pilote démontrant la faisabilité avant que de déployer l'application à l'échelle industrielle. Par ailleurs, nous avons choisi de mettre en évidence le problème du choix de l'entité du système physique portant les informations (et donc les tags). Ce problème a été souvent posé dans le cadre des travaux du groupe de recherche SCP du GDR MACS. Ainsi, la première application présentera le cas où le produit porte l'information (NRKanban) et le deuxième celui où le système représentant le lot de produits (Kanban) porte l'information. La résolution du choix de ce niveau d'agrégation n'est pas abordée dans cette thèse mais pourrait faire l'objet d'autres travaux de recherche. Dans notre cas, ce choix a été réalisé par l'entreprise sur la base de critères purement économiques.

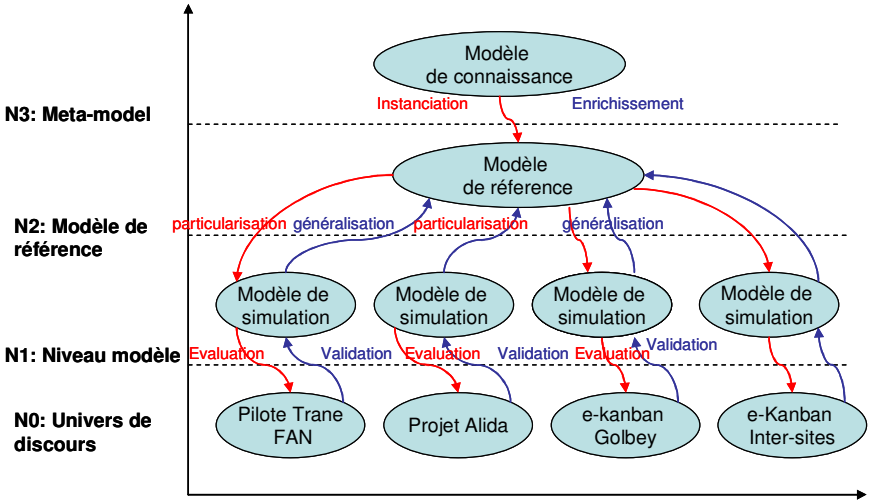


Figure 59 : Notre démarche de modélisation

Chaque itération avait pour but de maîtriser une partie des risques et d'apporter une preuve tangible de faisabilité et de pertinence du concept SCP par le bais de retours sur expérience avec des résultats chiffrées ou qualitatifs.

L'aspect incrémental se manifeste dans le fait que chaque itération augmente la quantité d'informations et de connaissances des systèmes du domaine étudié (voir figure 59). L'objectif est d'obtenir une méthodologie de construction des modèles de simulation qui soit basée sur l'instanciation d'un modèle de connaissances régulièrement mis à jour pour prendre en compte les nouvelles contraintes et les nouveaux concepts .

Ce chapitre sera donc structuré en deux parties correspondantes aux deux modes de pilotage Kanban et NrKanban en usage dans l'entreprise TRANE.

1. PROBLEMES DE SYNCHRONISATION LIES AU NRKANBAN

Comme il a été expliqué dans le cadre du « chapitre 1 » l'entreprise TRANE est confrontée à des besoins de traçabilité des produits fabriqués, mais aussi à des besoins de contrôle des lignes d'assemblage et de la synchronisation de celles-ci avec leurs feeders. En effet, au vu du fort volume d'informations à traiter, de la fréquence d'enregistrement des données et de la criticité de certains composants, il est apparu nécessaire, dans la résolution de ces problèmes, d'intégrer des technologies d'identification et de traitement de données.

Cette partie 1 du chapitre cinq présentera donc l'application des différentes étapes de notre méthode sur deux cas (un pilote et un cas plus étendu) relatifs à des systèmes de NRKanbans. Rappelons que ce type de kanban (Not-Replenishable Kanban ou Kanban non réapprovisionné) est utilisé pour approvisionner du matériel spécifique à une commande. A la différence d'un Kanban classique, la consommation de ce Kanban ne conduit pas à approvisionner une nouvelle pièce identique, il sert juste à donner l'autorisation de travailler, l'objet du travail étant donné par l'OF (issu de l'ERP) le premier dans la file d'attente des travaux à réaliser sur le poste considéré. Ainsi nous avons appliqué notre méthodologie de conception et d'intégration d'un SCP, dans un premier temps, pour choisir un pilote et pour montrer la pertinence de la solution proposée dans ce cadre. Le déploiement du SCP sur un cas d'application à l'échelle réelle industrielle sera présenté ensuite.

1.1 Define

Dans cette phase, le périmètre du projet est défini. Pour être sur d'appréhender tous les paramètres du système celui-ci ne se limite pas à un processus particulier de la société, mais est étendu à tous les processus qui ont un impact direct sur l'assemblage en atelier. Le tableau 3 montre une vue macroscopique du diagramme SIPOC de l'organisation de l'entreprise TRANE qui met en évidence les acteurs agissant dans le périmètre du projet. Le détail (SIPOC) n'est pas présenté ici en raison du grand nombre d'informations, de processus (les entrées) et de produits (les sorties).

Fournisseur/Clients	Attentes au niveau du système de pilotage
Production	un suivi temps réel de l'usine
Maintenance	connaitre l'évolution des indicateurs des équipements en temps réel
Qualité	amélioration de la qualité par la mesure
Bureau de méthode/ Process	aider à l'organisation et la conceptions des lignes d'assemblage
Chaine Logistique	Ordonnencement reactif et suivi des unités dans l'usine
Bureau de méthode/ Produit	Documentations onLine
Sécurité	Améliorer les aspects sécurité opérateur et machine

Tableau 3 : Les acteurs directs (clients/ fournisseurs) de l'usine TRANE

1.2 *Measure*

Le tableau 4 représente le diagramme des affinités basé sur le diagramme SIPOC précédent et sur l'expression des besoins brut des clients. Les idées amélioration y ont été transformées en CTQ et classées en trois catégories « Must be », « More is better » et « Delighter » pour aider à la conception du modèle « Kano ».

Customers	Improvement/ profitability (Customer needs)	RFID infrastructure Contribution (How?)	CTQ	Grade 3=Must Be 2=More Is Better 1=Delighter
ENGINEERING	Identify and remove the bottlenecks	Analysis of the real lead times	Real lead times Vs SOE times	3
	Speed up the modification process	Disponibility of data in real-time	Non-updated permanent drawings rate	2
	Automate the processes	Send informations to the equipments	Labor time & non-conformities costs due to wrong setting	2
	Track the special orders & prototypes	Have a quick access to the location data	Reliability of SOE Times	1
MANUFACTURING	Reduce cost of data collection	Use hand-held devices & readers	non-added value time	3
	Reduce cost of quality controls	Digitize the controls	quality control time	3
	Reduce the time for searching the right doc	Display automatically the doc	Doc display time	3
QUALITY	Ease the tracking of the critical components	Have a digitized Log Sheet	Log Sheet filling time	3
	Verify assembled components Vs BOM	Get as-built BOM for each product	Assembly errors cost	3
	Disponibility of the quality data	Have a centralized database	Decentralized metrics quantity	2
	Deliver meaningful 6 Sigma results	Make the data analysis easier	Reliability of the recorded data	2
	Ease the on-site repair	Have distributed information	Time to on site reparir	1
SUPPLY CHAIN	Manage the customer orders in real-time	Have a quick access to the location data	Unit tracking time	3
	Improve accuracy of inventory	Have the right consumption in real-time	Inventory accuracy rate	3
	Minimize the travellers	Display the documentation on line	Travellers preparation time / Sheets quantity	2

Tableau 4 : Le diagramme d'affinités présentant les opportunités du RFID et les CTQ

Dans cette étude, le modèle Kano montre que les métriques (CTQ) les plus critiques sont le délai et le coût (voir la "zone doit être" dans la figure 60).

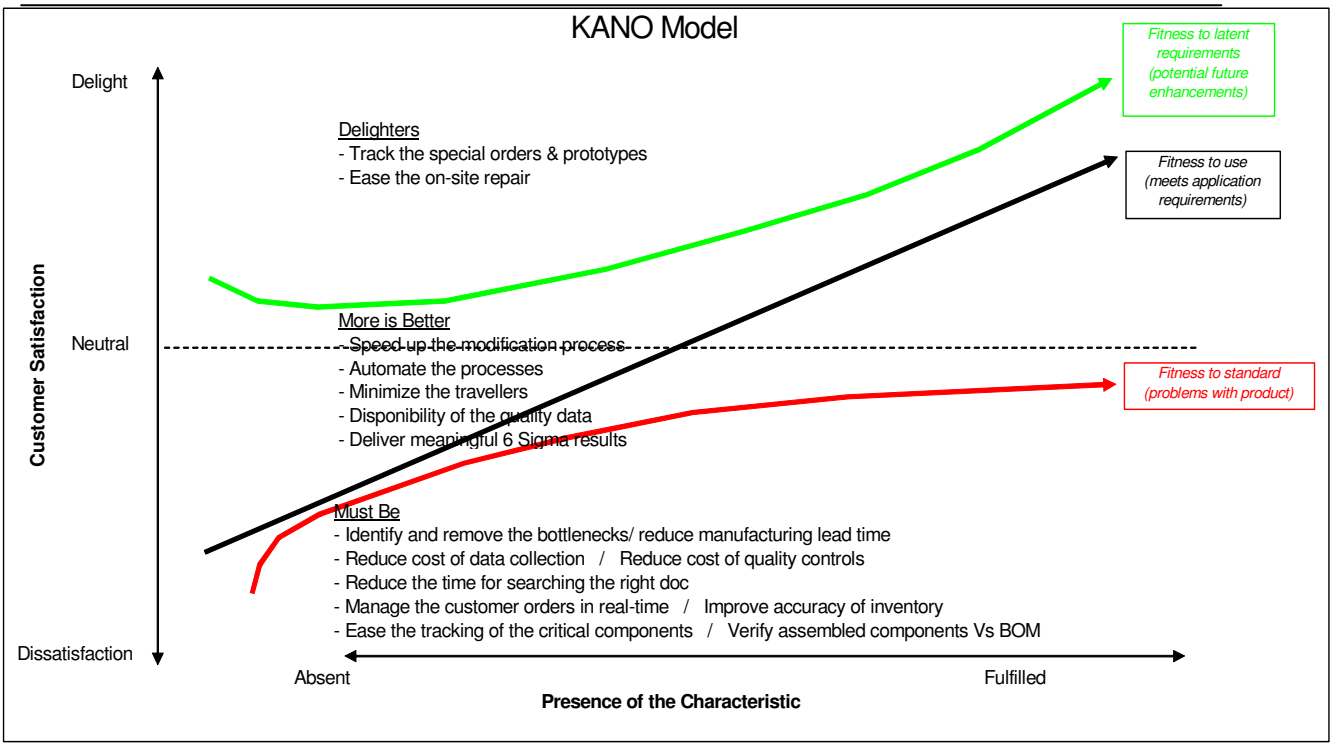


Figure 60 : le modèle Kano

L'analyse (CTQ Tree diagramme) des deux classes « Must be » et « More is better » montre que nous pouvons classer l'ensemble de ces métriques en 3 familles: les paramètres liés au temps (délai), à la qualité et au coût. Ces 3 familles ne sont pas indépendantes. En effet, les paramètres relatifs à la qualité peuvent être mesurés en termes de coûts dus à un mauvais réglage, ou au temps passé pour avoir les informations relatives au produit. Pour diminuer les délais en optimisant les différents flux des lignes d'assemblage et d'alimentation, une première réponse a été de gérer celles-ci en flux tirés en se basant sur les concepts de DFT. Toutefois, afin de mieux synchroniser les lignes d'assemblage et leurs feeders, nous devons créer des stocks aux points de découplage (IPK). Ce constat augmente le coût d'immobilisation et celui de la manutention. Le but de notre étude a donc été de trouver un compromis entre le coût et le délai en simulant plusieurs scénarios impliquant l'usage d'un SCP.

1.3 Analyse

L'objectif de cette phase est de choisir le pilote et le concept d'implémentation en se basant sur les résultats de la phase "measure". Sachant que toutes les lignes d'assemblage TRANE sont standardisées selon les règles de la DFT, le pilote sera sélectionné selon 3 critères:

- Le pilote doit montrer le maximum d'effet des métriques (CTQ) sur l'atelier (A).
- Le pilote ne doit pas être complexe: la notion de complexité est toujours discutable et pas facilement mesurable. Néanmoins, nous avons proposé certaines règles

intuitives qui sont les suivantes: Le nombre de postes de travail du pilote, le nombre de feeders ou le nombre de lignes d'assemblage à alimenter si le pilote est un feeder (B).

- L'existence physique du pilote : le but est de réaliser une étude en engageant un minimum de frais ou de risques physiques. A ces aspects s'en ajoute un autre important qu'il ne s'agit pas de marginaliser, nous voulons parler de l'aspect humain. En effet, pour l'intégration des nouvelles technologies ou des nouvelles pratiques une résistance se crée naturellement au niveau terrain et conduit à une perte de temps et d'énergie dans le projet. Par conséquent, nous avons trouvé plus simple de conduire des changements sur un nouveau processus plutôt qu'un processus existant (C).

1.3.1 *Choix du pilote*

Le choix a été réalisé en utilisant une matrice de pondération dans laquelle les différentes lignes d'assemblage et feeders sont sélectionnés, selon les 3 critères définis ci-dessus et les facteurs de pondération qui ont été définis et validés par les membres de l'équipe projet.

Output priority (from 1 to 10) >>>	7	9	9	8	8	7	6	5	5	5	5			
Line / Feeder	Product cost (Vs label cost)	Opportunities : tests number	Opportunities : critical comp tracking	Opportunities : sequencing	Product Lead Time	Manual data recording	Current data collection volume	Already piloted	Pilot complexity	Confidence in implementation	Line / Feeder stability	**Total**	**individual %**	**cumulative %**
PilotAB	9	9	9	9	9	9	9	9	3			546	20,0%	20,0%
Cha_L1_WC	9	9	9	9	9	9	9	0	3			501	18,3%	38,3%
Gol_L5_Scroll	9	9	9	3	3	9	9	0	3			405	14,8%	53,2%
												309	11,3%	64,5%
												227	8,3%	72,8%
												227	8,3%	81,1%

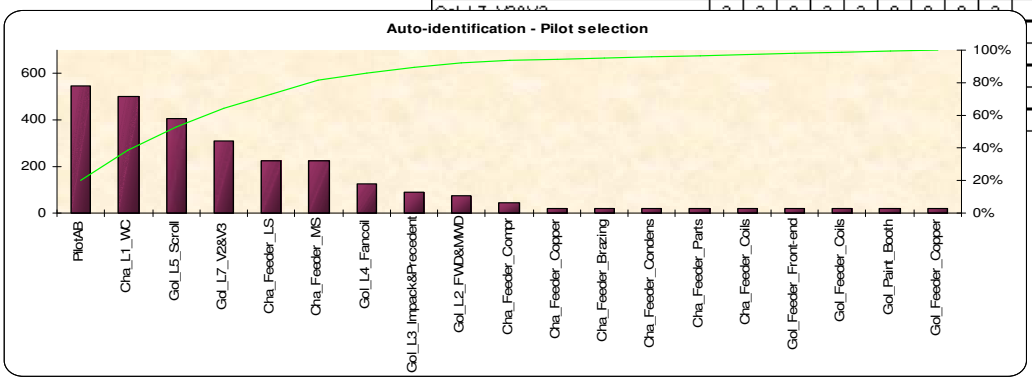


Figure 61 : la matrice de pondération et le résultat du Pareto

Le choix s'est porté sur le feeder « TRANE FAN ». Il s'agit d'une chaîne d'assemblage de ventilateurs, d'une capacité de production de 140 unités environ par jour, qui doit répondre aux besoins des usines de Charmes et de Golbey. Les demandes pour Charmes sont traitées en temps réel, au fur et à mesure des besoins du feeder Condenseur, alors que les demandes

de Golbey sont transmises par une étiquette Kanban, une fois par jour. L'assemblage d'un ventilateur s'opère sur 4 postes. Le TAKT TIME de la ligne est de 4,96 minutes et le temps d'assemblage est de 16 minutes (hors attente entre les postes). Une fois terminés, les ventilateurs sont empilés sur des racks et conduits soit directement au Feeder Condenseur de Charmes, soit en zone d'envoi pour être ensuite expédiés vers Golbey (voir figure 62).

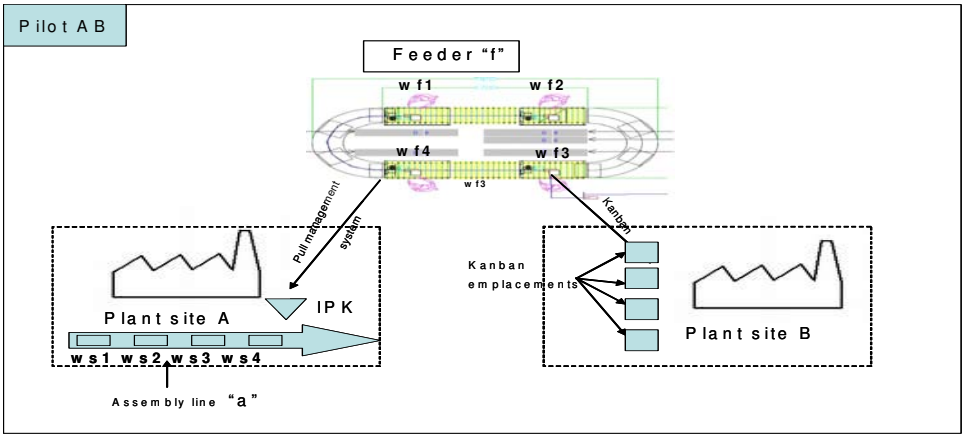


Figure 62 : le Pilote TRANE FAN

1.3.2 *Choix du concept*

Un deuxième objectif de cette phase est la « sélection du concept ». Il s'agit de donner une vue macroscopique de la mise en œuvre. Pour cela, plusieurs outils sont proposés dans notre méthode (tels que le QFD (Quality Function Deployment) ou plus simplement une matrice de pondération).

Il s'agit de proposer un système capable de gérer les demandes des deux sites ainsi que de suivre et de tracer les composants critiques. Issu de l'ERP, le Programme Directeur de Production (PDP) donne le travail hebdomadaire de la ligne d'assemblage du site Charmes. Ce PDP est le niveau le plus bas du système de gestion centralisé (ERP) (voir figure 63). Des Ordres de Fabrication (OF) sont aussi envoyés par anticipation au feeder afin d'assurer la disponibilité des composants. Le site Golbey exprime au feeder ses besoins en composants par des Kanbans et le site Charmes exprime ses besoins de recomplètement vers le feeder via les IPK. La gestion distribuée de ce feeder est nécessitée par la volonté de réduire les stocks aux points de synchronisation (IPK) –Voir pour rappel figure 62.

Par conséquent, les objectifs attendus pour le SCP sont:

- La fabrication sera sur commande: l'arrivée du produit sur un poste de travail particulier du feeder condenseur donnera un signal de déclenchement de la fabrication de ses composants. Le but est de diminuer le niveau stocks provoqué par une grande anticipation au niveau des composants.

- L'intégrité des données de fabrication doit être assurée par l'Auto-Identification et la traçabilité des composants critiques pour qu'en conséquence, la qualité de la production soit améliorée.

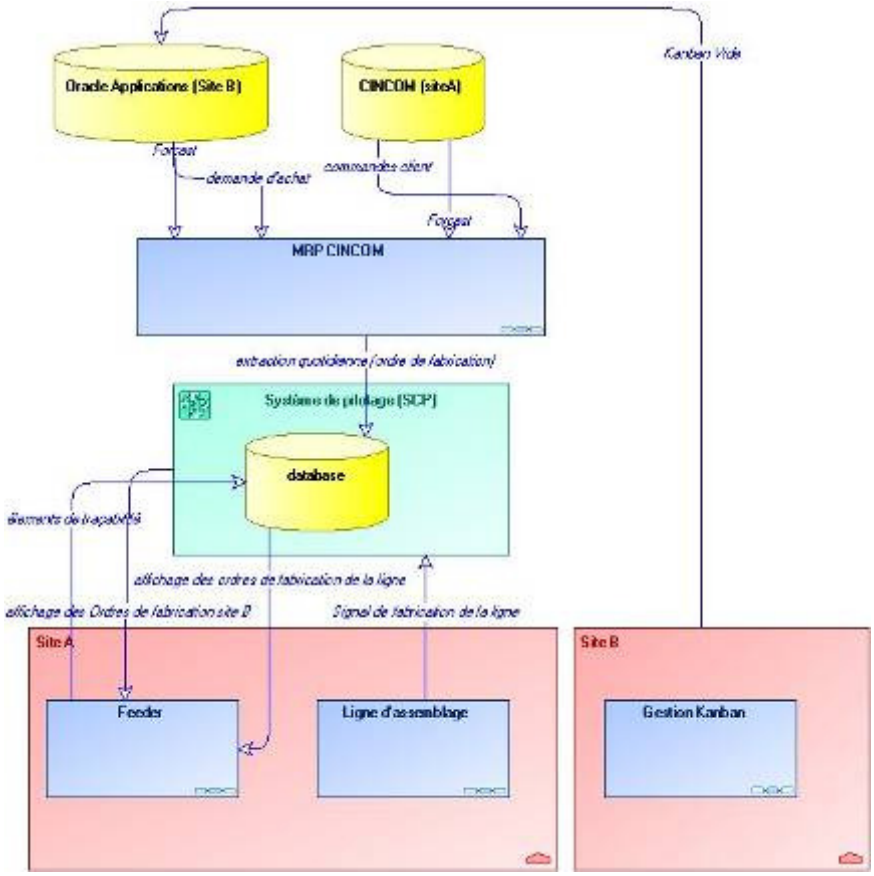


Figure 63 : Gestion des demandes

Reste la question de ce qui sera le meilleur moment dans la ligne d'assemblage pour l'envoi d'un signal de fabrication au feeder, pour être sûr que le composant arrive au bon moment (ni retards, ni anticipation). Pour répondre à cette question, nous avons procédé à diverses simulations de scénarii pour identifier à quel moment il convient d'envoyer le signal et évaluer les bénéfices en terme de temps et de stocks.

1.4 Software in the loop : conception du système de pilotage

1.4.1 Modèle de simulation

Comme nous avons expliqué dans les chapitres précédents, la simulation à événements discrets permet de simuler le comportement des lignes d'assemblage et des feeders dans le but de générer des statistiques et de donner au responsable du projet de bons indicateurs pour intégrer un système efficace de traçabilité et de contrôle (SCP).

Des modèles ARENA ont été élaborés selon notre approche qui différencie les différents flux (informations, logique…) (voir figure 64). Deux modèles sont nécessaires pour représenter le feeder TRANE FAN et la ligne d'assemblage condenseur (présentés dans la figure 62). Grâce aux modèles ARENA, deux types de résultats sont fournis: i) une animation visuelle des flux dans le modèle et ii) des documents traçant les différentes statistiques utiles à notre étude.

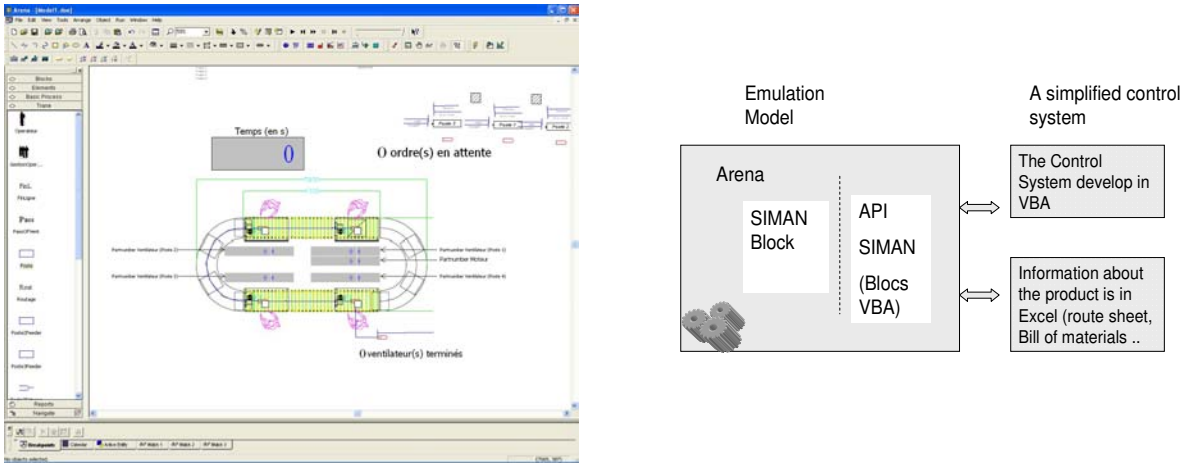


Figure 64 : le modèle de simulation du feeder TRANE FAN

1.4.2 *Processus de simulation: Analyses des différents scenarii*

Dans la première phase du processus de simulation, le flux du pilote « TRANE FAN » a été défini et les données prévisionnelles ont été établies par les experts du domaine. Le tableau 5 présente les principaux paramètres pour le modèle de simulation. Il s'agit du PDP de la ligne principale. Nous trouvons les commandes priorisées, les références, le nombre des composants attendus par le feeder "f", et les temps opérationnels sur la chaîne de montage (condenseur) des 4 postes de travail. Un tableau similaire fournit les mêmes informations sur le feeder.

Priority	reference	Component Number	N° Orders	tws1	tws2	tws3	tws4
1	C2	14	10	60	40,8	40,8	75,48
2	C1	14	20	55	40,8	41,82	73,44
3	D	12	30	37	64,26	27,54	69,36
4	C2	14	40	60	40,8	40,8	75,48
5	C1	14	50	55	40,8	41,82	73,44
6	D	12	60	37	64,26	27,54	69,36
7	C2	14	70	60	40,8	40,8	75,48

Tableau 5 : Un exemple de programme directeur de production (PDP)

Dans la deuxième étape, les différents scénarii d'implémentation des lecteurs RFID sont définis. Hypothèse 1 "H1" le lecteur est mis en place au niveau du poste de travail "ws1" ce qui veut dire que le signal de fabrication est envoyé au feeder au début de la chaîne de

montage de l'unité. Hypothèse 2 "H2": le lecteur est mis en place 2 au poste de travail 2 "ws2" etc…

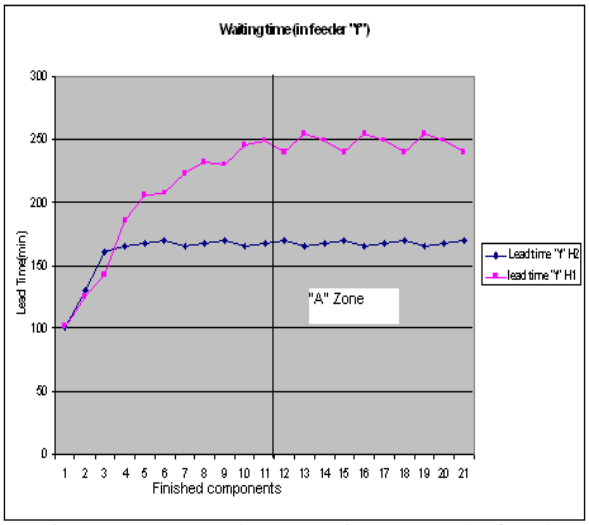


Figure 65 : Analyse statique sur le feeder

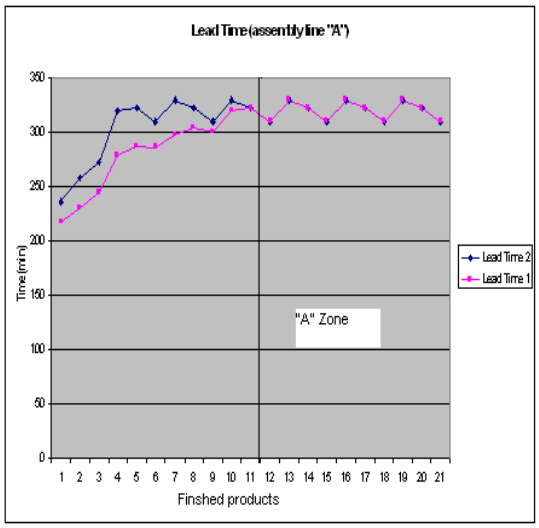


Figure 66 : Analyse statique sur la ligne

Les différentes hypothèses (H1= le lecteur est installé en tête de ligne d'assemblage, H2 = lecteur installé au poste 2, etc...) de position d'implantation des lecteurs RFID ont été testées pour mesurer l'impact de la position sur différents indicateurs tels les stocks en IPK, les délais, ...

Les figures 65 et 66 montrent les résultats sur l'indicateur délai en minutes par composant sur le feeder pour 65 et sur le produit fini pour 66 (l'indicateur stock a aussi été testé). Les analyses sont à observer uniquement dans la zone A pour laquelle le système a atteint son rythme nominal. Aucun écart n'est constaté sur la ligne d'assemblage qui dans les deux cas a réalisé son PDP. Par contre, sur le feeder l'hypothèse H2 permet de minimiser les délais d'obtention et les IPK.

Ce pilote permet de montrer que l'information portée par le produit, dans ce contexte de juste à temps en DFT et par l'information anticipée « du juste nécessaire» qu'il donne aux opérateurs, donne la possibilité d'ajuster en dynamique les ordres de fabrication des composants sur le feeder et ainsi conduit à la minimisation des stocks IPK de synchronisation. En effet, dans l'hypothèse 1 où le lecteur RFID est en tête de ligne d'assemblage, le système est dans une configuration équivalente au système centralisé sans lecteurs, mais pour lequel l'information serait donnée par des OF issus de l'ERP. Dans ce cas donc le SCP n'apporterait évidemment rien. A l'opposé, si le lecteur est au point d'IPK, il faudrait être extrêmement réactif, le taux de service serait probablement dégradé. Les scénarii d'émulation ont donc permis de trouver le bon emplacement qui maximise les indicateurs de performance tout en minimisant le nombre des lecteurs. Ceci étant fait, il est désormais possible de faire prendre les décisions au système de contrôle intégré à la base de

données (fonction principale du SCP). En effet, cette dernière centralise les informations issues du site Golbey par le flux de retour des Kanbans vides qui transitent par la base ORACLE, d'une part, alors que les informations terrain issues du site Charmes, y reviennent directement via les lecteurs RFID (figure 63), d'autre part. Cependant, à l'heure actuelle, ce système est perfectible car seules les règles utilisées par les opérateurs ont été programmées : aucune optimisation n'a été réalisée.

1.5 Implémentation du système de contrôle

Comme nous l'avons expliqué précédemment, dans toute implémentation, nous nous appuierons sur une architecture 3-tiers ou une architecture Modèle Vue Contrôleur. Il s'agit de différencier trois couches la « couche données », la « couche métier » et la « couche interface ou visualisation client »

1.5.1 Couche données

La figure 67 décrit la structure du système d'information développé. Afin de simplifier la réutilisabilité, la généricité et l'interopérabilité, le système d'information est construit sur la base des spécifications B2MML et IEC 62264 expliqué dans le chapitre 4

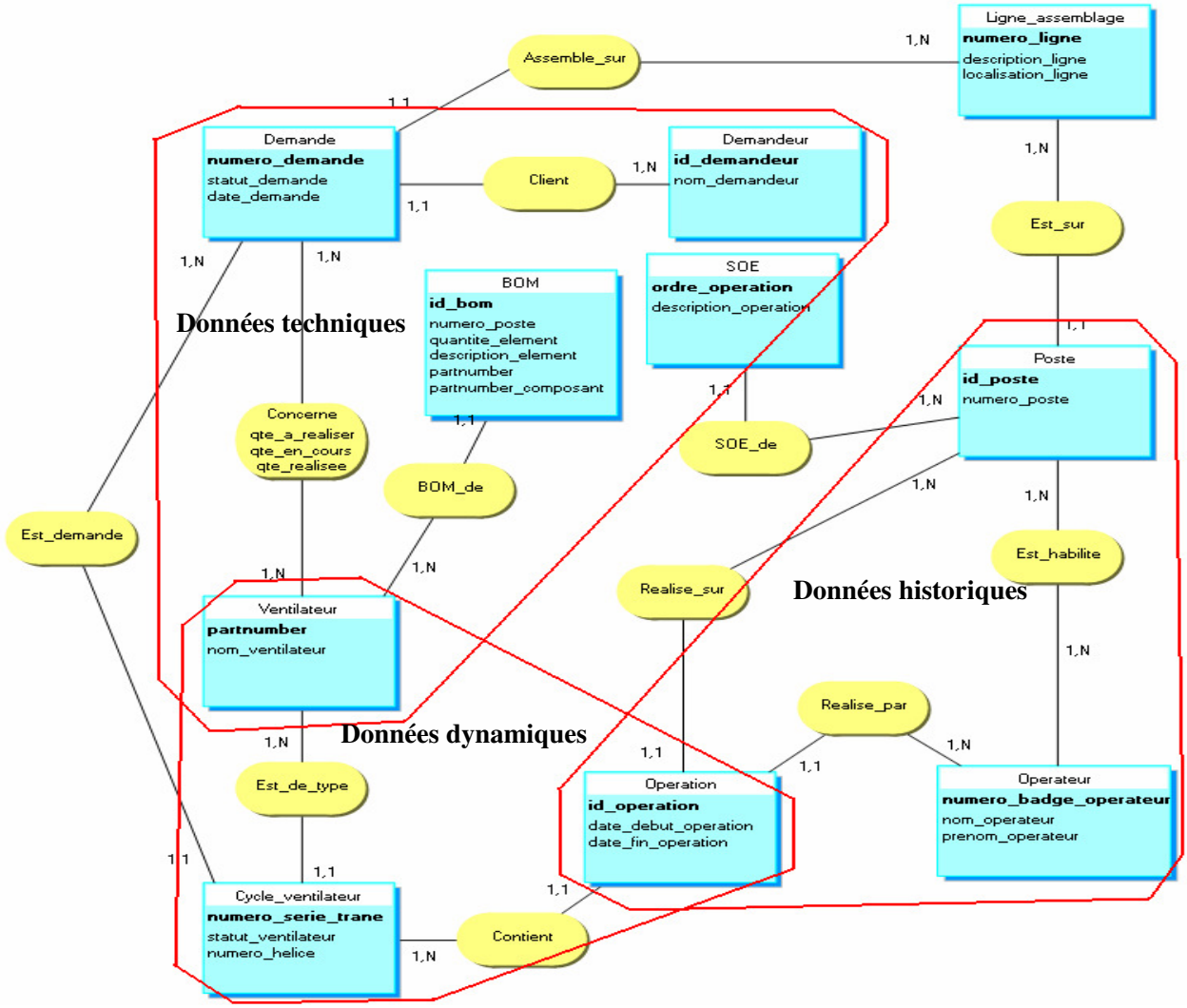


Figure 67 : Structure du système d'information

Au niveau du système de collecte et de stockage des données, nous nous appuyons sur les différents objets définis par le standard S95: la description de ces tables est définie en Annexe 7.

1.5.2 Couche Métier

La liste des OF n'est accessible que depuis le poste 1 du feeder TRANE FAN et permet à l'opérateur de choisir quelle demande satisfaire. Les demandes de Charmes apparaissent dans cette liste lorsque la ligne Condenseur a envoyé le signal de fabrication.

Pour les demandes de Golbey, l'opérateur au poste 1 a la possibilité de partitionner la fabrication d'une demande par RACK (Container). Un RACK a une capacité de 4 ventilateurs (paramétrable dans la partie d'administration). Pour une demande de Golbey, l'opérateur peut alors changer de demande tous les 4 ventilateurs fabriqués. En ce qui concerne les demandes de charmes, elles sont ouvertes (passage du statut à « O ») lorsque le

numéro de la demande est scanné sur le poste de la ligne condenseur. Lorsque l'opérateur lance une demande de Charmes au poste 1, il doit obligatoirement la terminer. Il n'a aucune possibilité de revenir sur la liste des demandes.

La date de fin d'opération sur chaque poste est mise dans la base de données par « LABVIEW » (logiciel de supervision du carrousel). Au poste 4, un trigger est déclenché lorsque la date de fin d'opération est mise à jour, et permet de fermer les ventilateurs et la demande si elle est terminée. La définition des plus importants objets du système développé est présentée en Annexe 8.

1.5.3 Couche client:

À sa prise de poste, l'opérateur devra s'identifier, en scannant le code à barres de son badge. Le poste 1 possède une particularité par rapport aux autres postes. L'opérateur peut en effet choisir quelle demande il va satisfaire en premier. Pour lancer une nouvelle demande, ou reprendre une demande lancée, il lui suffit juste de cliquer dans la liste sur le numéro de la demande choisie (voir figure 68).

Figure 68 : page des demandes sur le poste 1

Sur les différents postes, l'opérateur verra ensuite un écran, qui regroupe toutes les informations utiles :

- Les informations sur la demande: numéro d'ordre de fabrication, demandeur, type de ventilateur, quantité réalisée/à réaliser (postes 1 et 4 uniquement) ;
- La BOM (Bill Of Materials) qui indique quels composants utiliser sur le poste ;
- Une OMS (Operation Manufacturing Sheet) simplifiée qui présente les grandes opérations à réaliser sur ce poste.
- Une zone de confirmation/erreur de « scannage » qui prévient l'opérateur et l'informe de la source de l'erreur.

- Une zone de secours en cas de défaillance du lecteur qui permet aux opérateurs de rentrer au clavier le numéro du code à barres.

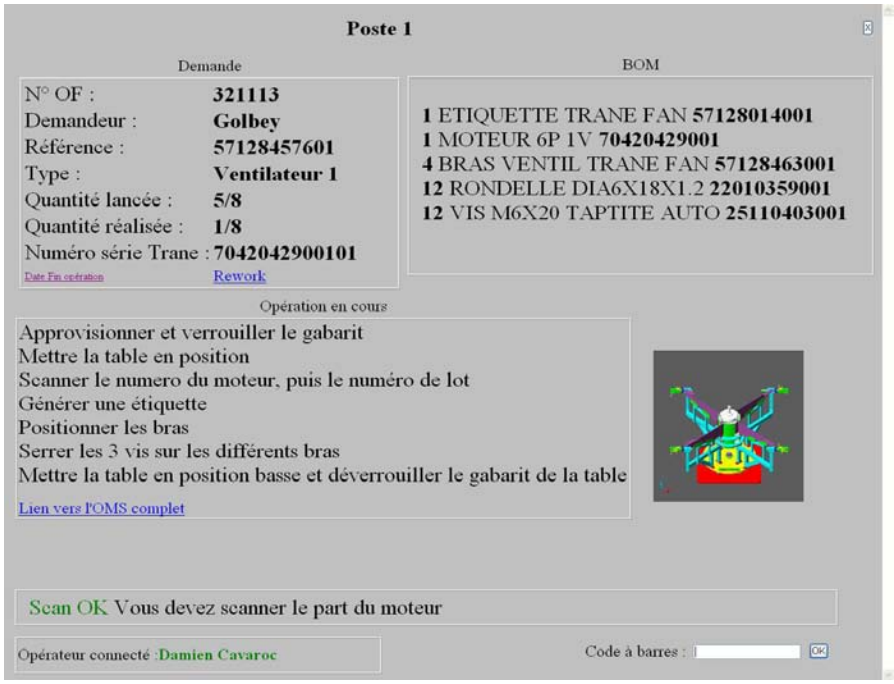


Figure 69 : interface utilisateur du système développé

1.6 Hardware in the loop : validation du système de contrôle

1.6.1 La plate-forme d'émulation utilisée pour la validation du système de contrôle

Dans cette phase, nous utilisons le même modèle d'émulation développé avec ARENA, présenté précédemment. Le système de contrôle est composé par un système de communication liés aux deux ERP (ORACLE applications et CINCOM). Ces deux ERP fournissent les informations nécessaires à la fabrication telles que les ordres de fabrication, les nomenclatures, les gammes…) et l'interface utilisateur permet d'assister les opérateurs dans leur travail en affichant les méthodes de travail et les nomenclatures.

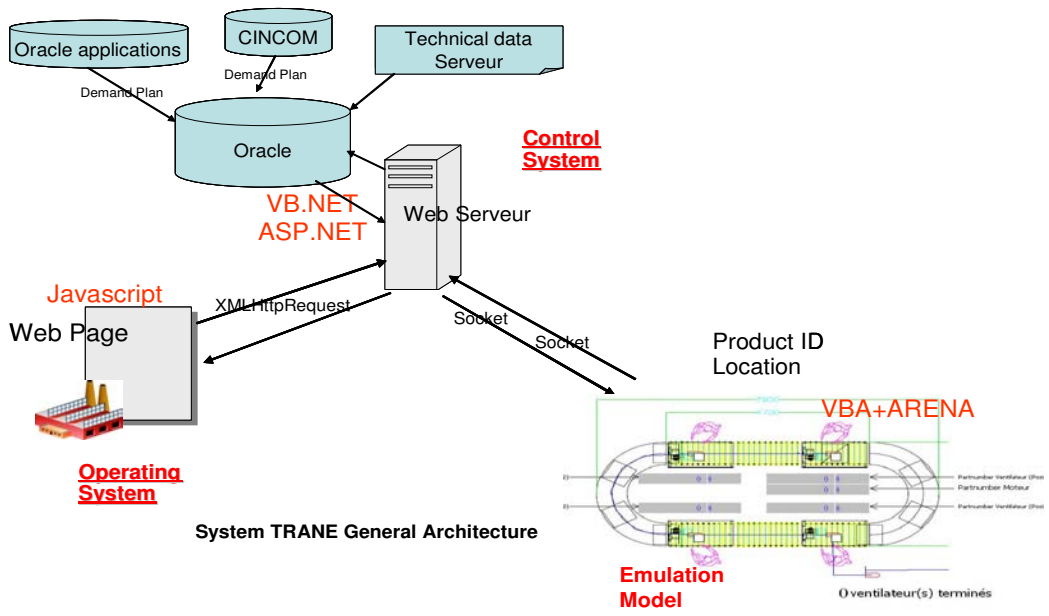


Figure 70 : L'architecture de la plate-forme d'émulation

Le mécanisme de communication de l'application développée en ARENA avec les différentes pages web est expliqué dans la section suivante.

1.6.2 Communication entre le modèle de simulation et le système de pilotage

1.6.2.1 La communication système de contrôle→ARENA

La communication dans le sens système de contrôle (application web) ARENA permet de signaler à ARENA le lancement d'un ordre de fabrication. Dans le block Arrivals du modèle ARENA nous avons besoins de paramétrer une entité « produit » pour faciliter la création des suivantes (Annexe 9).

1.6.2.2 Communication ARENA → Système de contrôle

La communication dans le sens ARENA vers l'application web permet d'émuler le « scan » des différents Tags RFID. En effet, le modèle ARENA envoie, via un socket les informations scannées (N° série TRANE, n° de lot du moteur,…).

La gestion du socket se fait grâce à la DLL SocketClient que nous avons développé, qui permet de manipuler les sockets de façon plus transparente. Le code VBA du modèle ARENA ne se contente que de créer le socket, puis d'envoyer à l'application les données, précédées du numéro du poste concerné (Ex. : 2 1234567891201). À la réception des données d'ARENA, l'application les stocke dans un tableau de 4 lignes (une pour chaque poste). Chaque poste client interroge le serveur régulièrement (toutes les secondes), pour savoir s'il a reçu une nouvelle information. Une description détaillée de l'interface communication est mise en (Annexe 9).

Le diagramme suivant (voir figure 71) schématise la communication entre le système de pilotage et des modèles de simulations

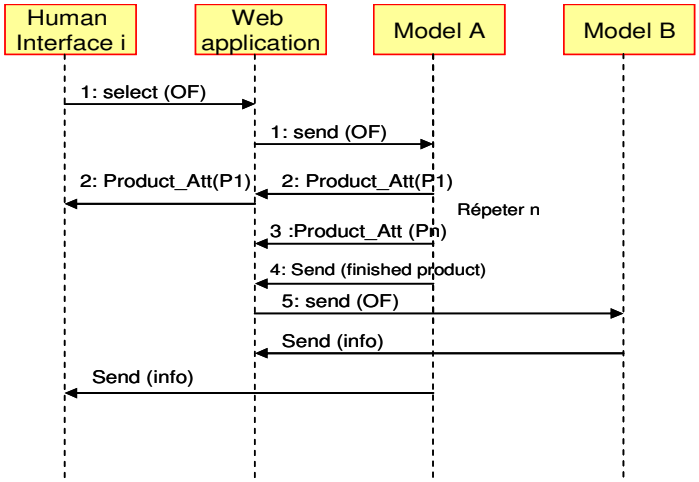


Figure 71 : Le digramme de séquence du protocole de communication

1.7 Déploiement dans l'usine

Suite à des retards au niveau de la qualification de la matière première (moule d'hélice), la mise en production du TRANE FAN a été, à ce jour, suspendue mais la validation du concept a été suffisamment avancée pour permettre le déploiement sur une ligne à l'échelle industrielle. Il s'agit de la ligne FAN COIL qui a été choisie à l'issue de la mise en œuvre de la phase « Define ». Cette ligne d'assemblage se distingue par une grande diversité de produits (Customer to Order). Elle compte 22 types de produits plus les options (20% de produits sont avec options) et est alimentée par cinq feeders produisant les sous-ensembles par NrKanban. Cette complexité est accentuée par l'ajout d'un nouveau produit spécifique et donc d'une deuxième ligne d'assemblage « ALIDA » partageant les mêmes feeders ainsi que certains postes de travail de la ligne FAN COIL. Le but était d'augmenter la capacité de ces deux lignes d'assemblage de 120 000 unités/an à 150 000 unités/an (500 unités/jour à 625 unités/jour). Par conséquent le TACKT time devait passer de 2.9 minutes à 2.3 minutes. Pour aider les concepteurs de la nouvelle ligne à valider sa capacité et l'impact sur la ligne FAN COIL nous avons créé un modèle de simulation en utilisant notre plate forme de génération de modèles automatiques (annexe 1). Sur chaque poste de travail, l'opérateur a besoin essentiellement de trois types de documentations les OMS (Operating Method Sheet), la nomenclature produit et les ITS (Instruction de Travail Spéciale) pour traiter les options.

Dans l'étape « define », nous avons mis en évidence aussi qu'il fallait centrer notre étude sur le dernier poste de travail « le poste de colisage ». Avec l'augmentation de la production des accessoires ainsi que leur diversification, les opérateurs de ce poste rencontrent des difficultés avec la documentation mise à leur disposition pour la réalisation de leur travail. Cette étude a fait ressortir plusieurs points :

- Dossiers incomplets.
- Trop de temps consacré à la recherche de la documentation.
- Écriture manuelle des feuilles de colisage de chaque accessoire.
- Le nombre trop important de documents inutilisés ou ne concernant pas le poste de travail dans un dossier.

Chaque dossier comporte plusieurs documents (Ce qui représente approximativement 12 documents à consulter pour assembler 1 seul accessoire). Les CTQ qui ont été mis en évidence lors de la phase « Measure » sont essentiellement le temps et la qualité. La phase « analyse » a montré quelques anomalies détectées par des relevés effectués sur trois semaines consécutives:

- Première semaine : 11 documents manquants dans les dossiers de fabrication. (Temps de recherche de ces documents : 210 minutes).
- Deuxième semaine : 7 documents manquants dans les dossiers de fabrication. (Temps de recherche de ces documents : 120 minutes).
- Troisième semaine : 8 documents manquants dans les dossiers de fabrication. (Temps de recherche de ces documents : 150 minutes).

Le temps moyen d'accès à la documentation est de 57 secondes. Ce temps varie selon que l'opérateur est novice ou expérimenté (Voir figure 72).

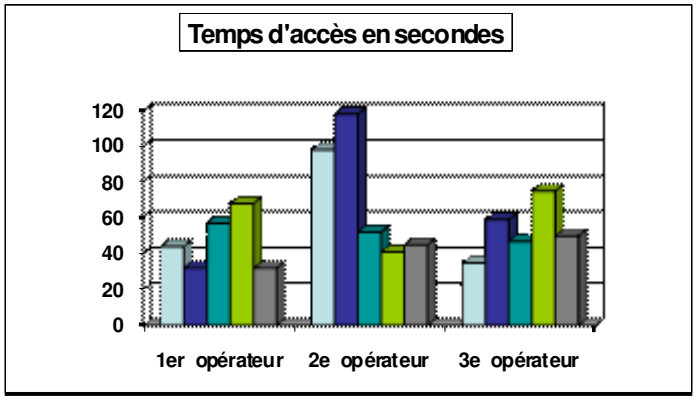


Figure 72 : Le temps d'accès à la documentation

Pour répondre à ces différents problèmes un premier travail concernant la diminution du nombre de documents et l'édition automatique des étiquettes a été réalisé.

Ensuite nous avons mis en place un système d'information capable d'afficher les OMS et la BOM des unités qui passent sur la ligne en fonction de leur numéro d'article (code à barres). Il permet surtout d'afficher exactement l'information nécessaire à un instant donné (voir figure 73).

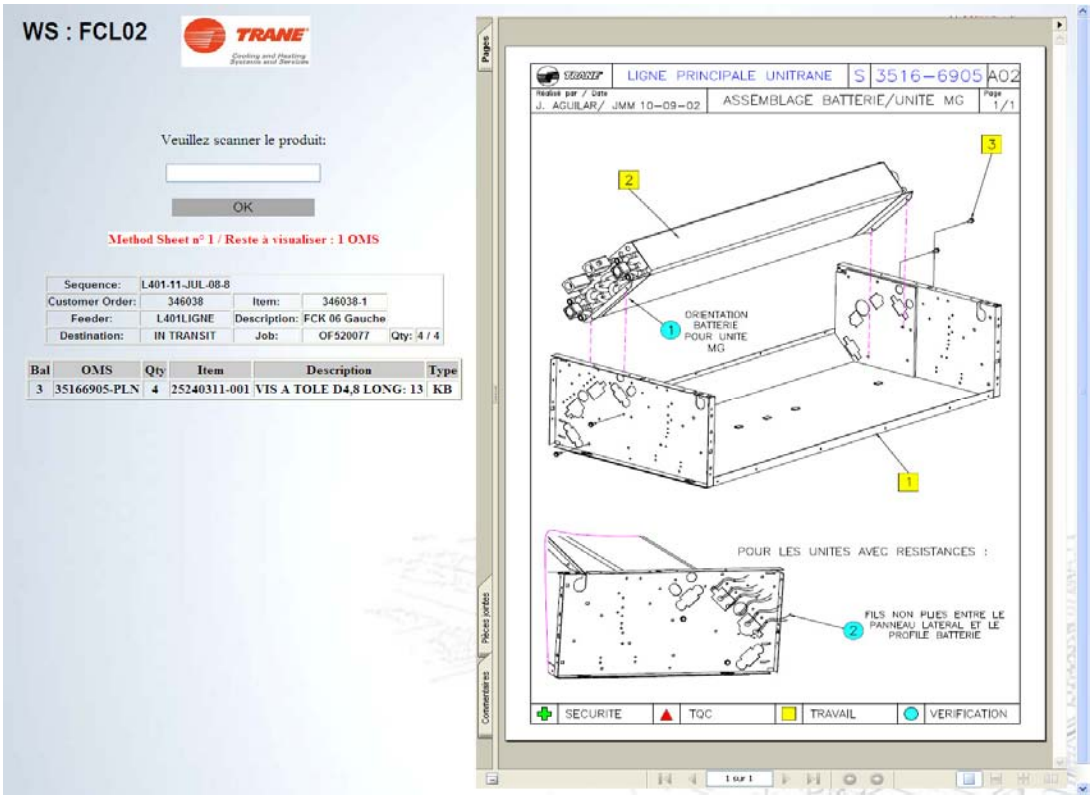


Figure 73 : OMS et BOM on-line

La simulation dans ce cadre a servi, surtout, à valider la conception de la nouvelle ligne avec des hypothèses fortes (pas de problèmes de synchronisation). Le modèle de simulation résultant nous a permis d'enrichir le modèle de connaissances de plus haut niveau. Il s'agissait, dans ce cas, d'intégrer dans le modèle de connaissances que deux lignes d'assemblage peuvent utiliser les mêmes postes de travail et que certains postes peuvent être dédoublés pour augmenter la capacité de la ligne d'assemblage.

1.8 Retours sur expérience

Aujourd'hui l'application est installée sur 20 postes de travail. Elle a été déployée sur une autre ligne d'assemblage et est amenée à être déployée sur toute l'usine de Golbey et celle de Charmes. Cette application a engendré deux types de gains que nous présenterons dans les sections suivantes.

1.8.1 Les gains directs :

1.8.1.1 Les gains réalisés

Le temps d'accès à la documentation a été diminué (de 57 secondes à 8 secondes). Cependant nous ne pouvons pas réellement valoriser ce gain dans mesure où la documentation n'était pas toujours consultée (en particulier, dans le cas des produits

identiques qui se suivent, faible rotation des opérateurs, connaissance produits..). Un autre point important est la réduction du temps de mise à jour des documents papiers dans l'usine (essentiellement les OMS) que nous n'a pas pu mesurer dans le cadre de cette étude.

1.8.1.2 Les gains attendus

Les gains attendus sont des gains que nous estimons avoir après un déploiement complet du système développé. Il s'agit de la suppression des documents papiers (11k€ par site) et la réorientation du travail de deux personnes (par site) qui travaillent à plein temps sur le tri de ces dossiers (gains approximatifs de 142 k€).

1.8.2 Les gains indirects

En termes de qualité nous avons obtenus des résultats essentiellement dans la gestion des options (grâce a une mise en évidence des ITS).

Par ailleurs, comme nous l'avons expliqué précédemment l'aspect humain joue un rôle très important dans tous les changements de méthodes de travail, implémenter cette première partie (de SCP) avec succès a permis de rendre crédible le concept et créer une dynamique intéressante autour des technologies d'auto-identification et des outils d'aide à la décision.

En termes de perspectives nous pensons remplacer (toujours dans le cadre du projet ALIDA) les dossiers de fabrication par une puce RFID ou et étiquette codes à barre qui suivra le produit tout le long de son cycle de vie. Elle sera le lien avec le système d'information développé. La deuxième étape est de permettre une bonne synchronisation entre les lignes d'assemblage et leurs feeders pour réduire les stocks aux points de synchronisation et pour s'assurer de l'adéquation unité-composant. Cette étape sera supportée par le modèle de simulation développé dans le cadre de la conception de la ligne pour concevoir et valider les points de synchronisation. Enfin, nous pensons développer, sur la base de l'existant (document Plan de Qualité Permanent (PQP)), un PQP électronique qui sera stocké sur la puce RFID. Cela permettra d'améliorer le processus de la maintenance chez les clients.

2. PROBLEMES DE SYNCHRONISATION LIES AU KANBAN (PROCESSUS DE DECOUPE)

Afin de parfaire la validation de notre méthodologie nous l'avons appliqué sur un autre mode de gestion. Il s'agit du processus Kanban. Cela nous permettra de montrer l'apport du SCP dans le cadre dans ce type de gestion, d'une part, et d'aborder le choix d'une identification à la maille du lot de produits, d'autre part.

Cette étude ne nécessitera pas, dans un premier temps, un modèle de simulation dans la mesure où le système physique existe et que notre objectif est de ne pas changer les règles de pilotage (règles des relance, changements de priorité.) mais de les contrôler (flux synchrones). Par conséquent, les phases «Software in the loop » (du fait que nous ne changeons pas des règles de pilotage) et «Hardware in the loop» (dans la mesure où le système physique existe et que l'impact au niveau système d'information peut être validé hors ligne) seront simplifiées.

Le système développé que nous appelons « e-Kanban » a été, dans un premier temps, développé pour un pilote (gestion de la tôlerie de Golbey pour Golbey). Ensuite, il a été déployé pour la gestion multi-sites de la matière (Charmes/Golbey) pour combler les lacunes du système EDI classiques de l'entreprise TRANE (les fax, e-mails et fichiers EXCEL partagés). Les sections suivantes montreront le déroulement de notre méthodologie.

2.1 *Define*

Nous avons choisi comme cas d'application la cellule « Front End » qui fabrique les composants cuivre, tôlerie et mousse pour les deux usines (Charmes et Golbey). Cette cellule constitue donc un feeder pour alimenter en composants les lignes d'assemblage de ces deux usines. Sa particularité est la complexité de sa gestion à cause des objectifs contradictoires de découpe (un taux de chute minimal et un temps de fabrication minimal). La figure 74 montre la « Process Map » du système étudié. Le but est de lister d'une manière macroscopique les différents processus liés à notre étude et les différentes entrées-sorties de ces processus. Les flèches en bleu correspondent aux flux d'informations et celles en rouge aux flux physiques.

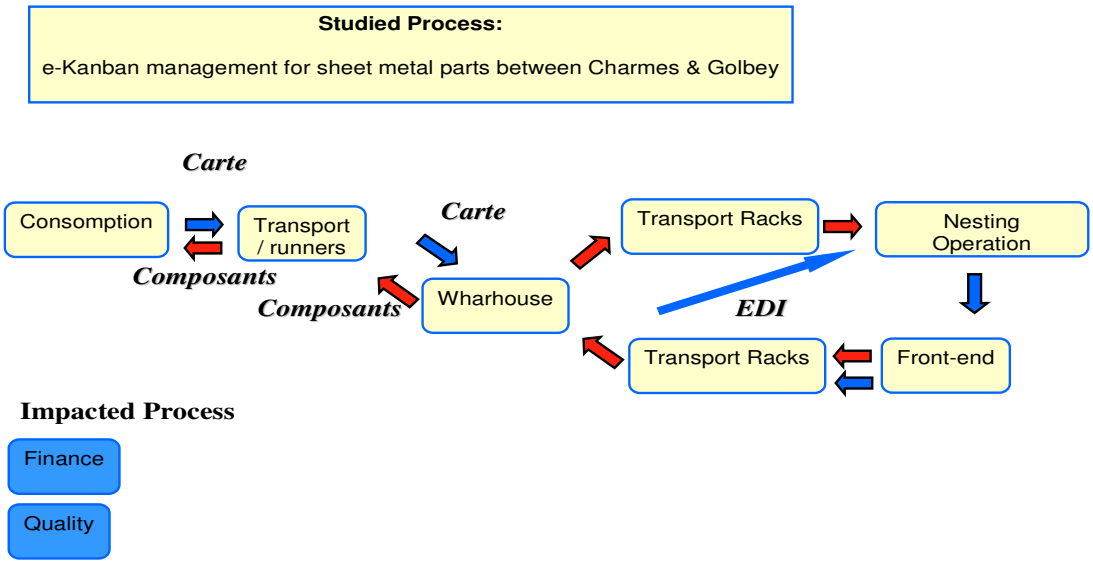


Figure 74 : « Process map » du processus de gestion des Kanbans tôlerie

En plus des processus métiers s'ajoute des processus supports comme la qualité et les finances pour la gestion des coûts main d'œuvre et la consommation matière.

2.2 *Measure*

Cette phase a pour objectif d'identifier les métriques répondant aux exigences clients (CTQ). Pour répondre à cet objectif nous avons étudié les différents processus présentés dans la phase «Define » plus en détail. Les besoins s'expriment tout au long du processus défini dans les 3 figures 75, 76 et 77. Dans ces figures chaque processus est décliné en activités reliées par des flux d'informations. A chaque activité nous avons associé les risques d'anomalie et les indicateurs impactés.

L'explication rapide du processus étudié fait référence aux figures 75 et 76. Une carte Kanban consommée correspond soit à une boite vide ou une carte Kanban qu'il faut relancer, le runner (rappel : approvisionneur) se charge de la ramener au magasin. Le magasinier met la carte en attente et envoie le contenant à Golbey. Ensuite, le processus d'imbrication (génération des programmes de découpe) va envoyer une fiche suiveuse à la cellule front-end ; à la fin de la fabrication la cellule front end envoie donc les composants et les informations concernant le rack dédié.

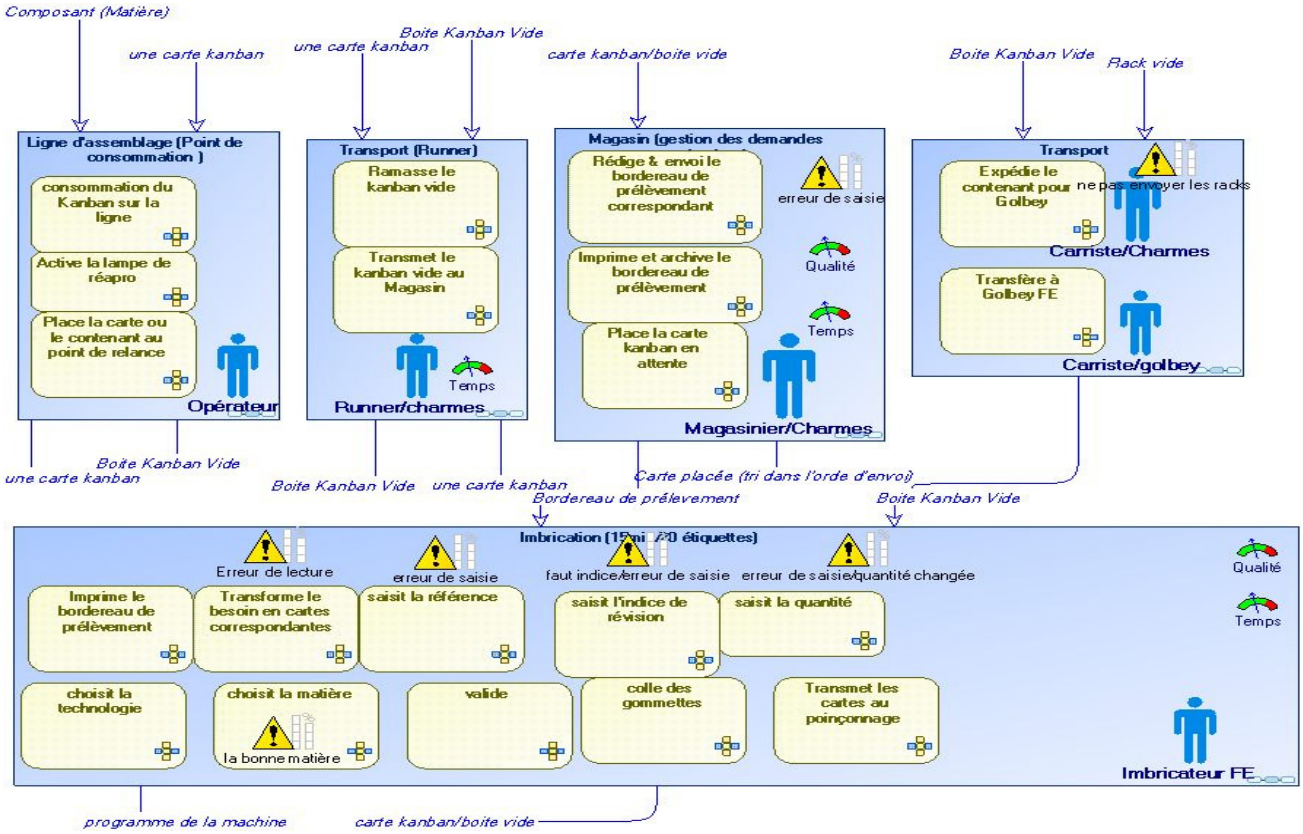


Figure 75 : Processus d'envoi de la demande et des containers vides de Charmes à Golbey

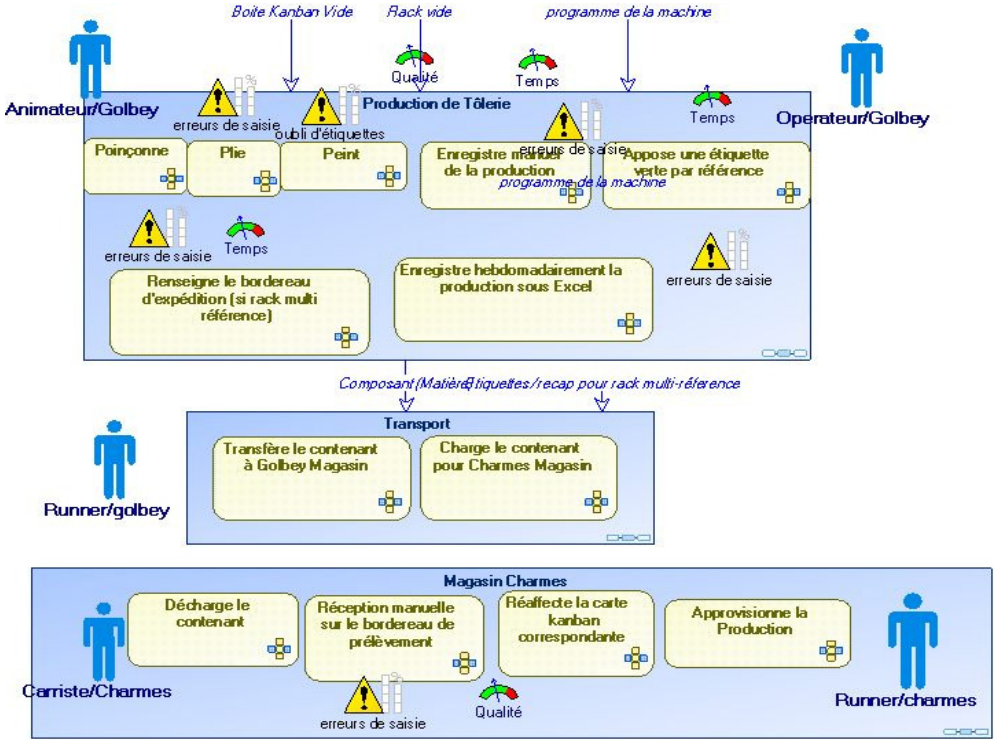


Figure 76 : Du processus de fabrication de Golbey à la livraison des composants

La figure 77 montre la boucle de suivi mise en place pour avoir plus de visibilité. Nous avons aussi pu mesurer le temps moyen de chaque tâche.

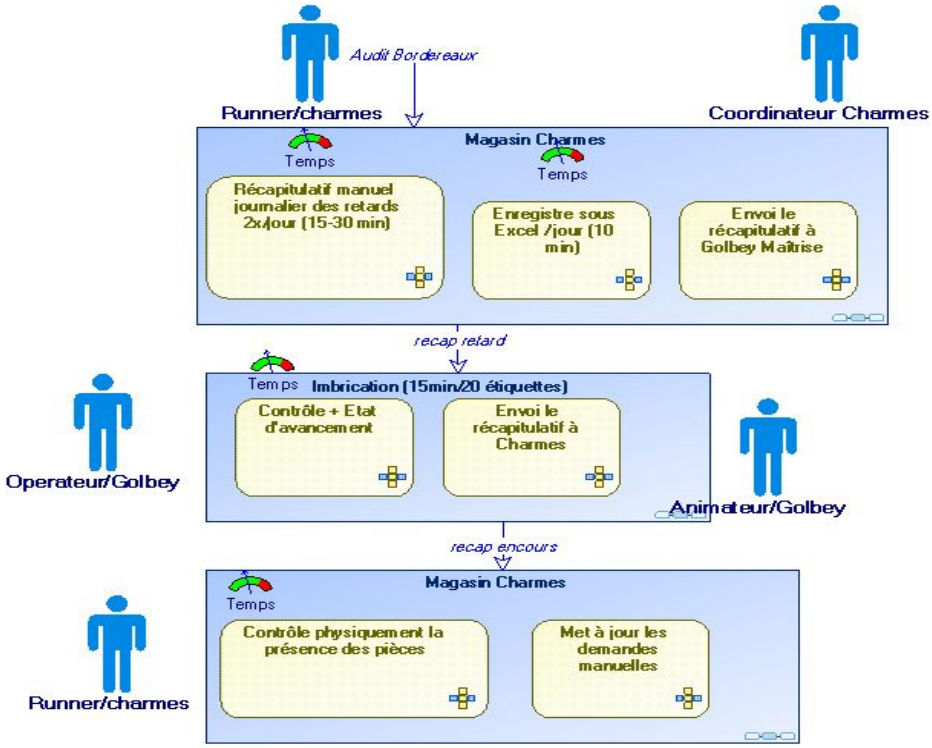


Figure 77 : Boucle de suivi des Kanbans qui transitent entre Charmes et Golbey

2.3 *Analyse*

2.3.1 *Anomalies de l'ancien système*

L'étude six-sigmas a montré des importantes lacunes dans le système EDI mis en place. En effet, 10% de fax ont été perdus, il n'y a aucune information retour sur les demandes et surtout aucune visibilité sur les encours. Pour avoir un suivi et un minium de visibilité des boucles de contrôle ont été mises en place. Ces points de contrôle étant manuels, ils ont engendré une désynchronisation entre les flux physiques et les flux d'informations. Par ailleurs le suivi par plusieurs saisies manuelles est considéré comme une activité à non valeur ajoutée (et contraire aux objectifs « Lean Manufacturing » prônés par l'entreprise).

2.3.2 *Activités à non valeur ajoutée*

Les activités à non valeur ajoutée détectées dans ce processus sont les suivantes :

- Rédaction du bordereau de prélèvement.
- Envoi du bordereau de prélèvement à Golbey.
- Impression et archive du bordereau de prélèvement.
- Au niveau de l'imbricateur à Golbey.
- Impression et archive du bordereau de prélèvement.
- Imbrication du Kanban : saisie de la référence, de l'indice de révision, de la quantité, choix de la technologie, de la matière, validation.
- Réception manuelle sur le bordereau de prélèvement.

Ces tâches sont non seulement des tâches à non valeur ajoutée mais elles sont sujettes à des erreurs de saisies et des oublis.

2.3.3 *Points de synchronisation*

Les points de synchronisation ou les points de contrôle que nous avons retenus sont les suivants :

- Envoi de la demande de Charmes : sous formats de fichiers directement exploitables par le logiciel d'optimisation à Golbey avec un enregistrement de la demande dans le système d'information avec le statut « Encours ».

- Fin de production à Golbey : changement du statut de la commande à un statut fin production

- Réception à Charmes : le statut passe à « R »

D'autres points peuvent être déterminés dans le cadre de l'étude de synchronisation des différentes boucles de Kanban. Pour réaliser cette étude nous allons nous appuyer sur le système de contrôle développé pour alimenter un modèle de simulation ou/ et d'émulation

2.4 *Software in the loop*

Le système de contrôle à développer concerne un système physique existant dont les règles de pilotage sont déjà pratiquées dans l'usine (système Kanban). L'utilisation de modèle de simulation ne nous nous semble pas justifiée dans ce cas. Néanmoins la phase analyse a permis de mettre en évidence des opportunités de progrès (aux niveaux des flux contrôlant –propriétés synchrones) en particulier elle a permis de définir les points de désynchronisation physiques/informations les plus critiques.

2.5 *Implémentation du système de contrôle*

Le développement du système de contrôle suit l'architecture MVC que nous avons développée dans notre approche. Nous retrouvons une couche donnée, une couche métier et une couche visualisation.

2.5.1 *Couche données*

Une base de données a été créée sur la base des trois types de données : dynamiques (réf A), historiques (réf B) et technique (réf C) (voir la figure 78).

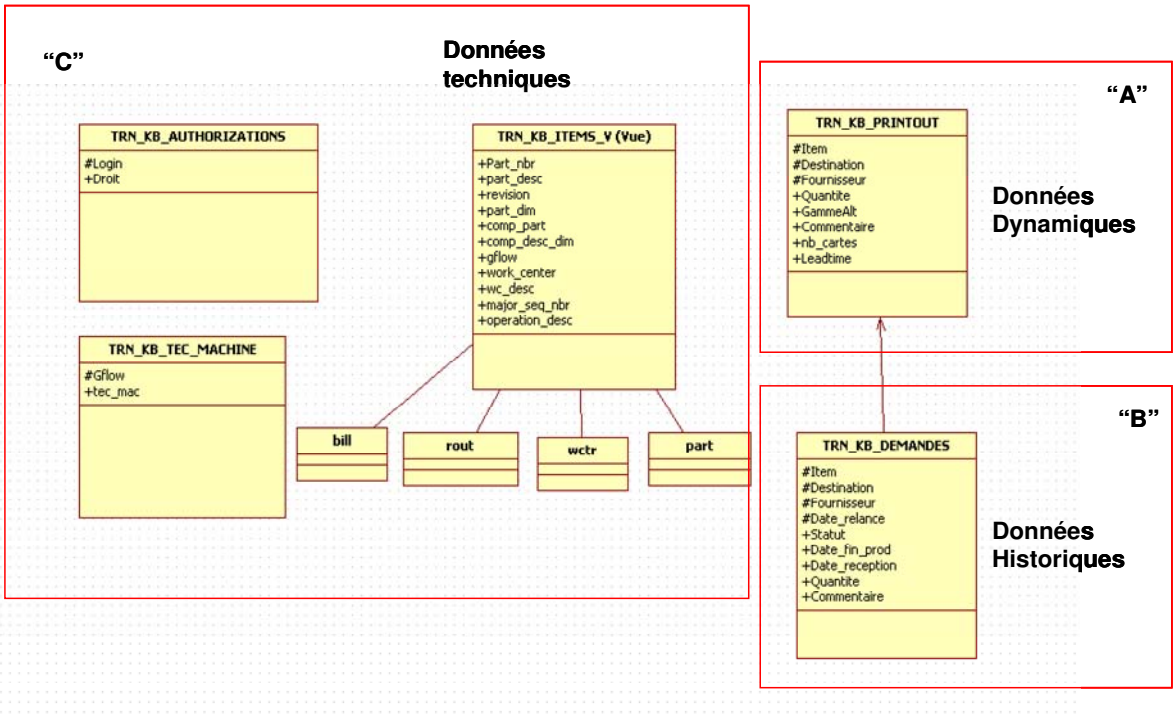


Figure 78 : Modèle conceptuel de données

Les données techniques proviennent essentiellement de l'ERP au moyen d'une vue d'oracle[5] , est concerne la description des produits, des machines et les autorisations liées à l'application. Les données dynamiques concernent la quantité du Kanban, fournisseur, destination,…En historique et au moyen de la table TRN_KB_DEMANDES nous enregistrons le nom de l'article, la date de relance, la date fin production et la date de réception…

2.5.2 *Couche métier:*

On en déduit de l'analyse du besoin la nécessité d'identifier les articles de manière unique et d'avoir un suivi des demandes entre Charmes et Golbey. Plusieurs fonctionnalités sont prises en compte par le « e-Kanban ». Nous décrirons ces fonctionnalités dans les sections suivantes.

2.5.2.1 Générer les étiquettes

Cette fonction permet d'imprimer des étiquettes codes à barres pour identifier les produits. L'utilisateur choisit le produit pour lequel il veut générer une étiquette. Il peut modifier les donnés dynamiques de ce produit tels que la quantité, le fournisseur et la destination…. (Pour plus de détail voir annexe 6)

2.5.2.2 Envoyer une demande

Cette fonction génère un fichier qui contient les informations sur une relance donnée : l'identifiant du produit, la date de relance, la destination, le fournisseur, le statut, la quantité relancée, la description de la tôle et l'indice révision etc... En effet, la fonction permet de récupérer le numéro de l'item quand on scanne le code barres du produit. Elle crée la relance dans la base et construit le fichier. Ce fichier est directement exploitable par le logiciel de découpe.

Remarque

Le schéma de la table des relances contient un attribut appelé « statut » (voir MCD). Celui-ci informe sur l'état d'une relance. Le cycle d'une relance est le suivant :

(Ouvert (O)->En cours (E)-> fin production (P) ->Fermé (F)->Reçu (R).

[5] Une vue est une table virtuelle, c'est-à-dire dont les données ne sont pas stockées dans une table de la base de données, et dans laquelle il est possible de rassembler des informations provenant de plusieurs tables. On parle de "vue" car il s'agit simplement d'une représentation des données dans le but d'une exploitation visuelle.

2.5.2.3 Envoyer un accusé de réception

Cette fonction génère un fichier qui contient les informations sur les relances réceptionnées. Même cas que pour l'envoi, cette fonction crée un fichier qui contient les informations sur les articles reçus.

2.5.3 Couche accès aux informations : Visibilité terrain

2.5.3.1 Historique entre 2 dates

L'objectif de cette fonction est de fournir la liste des relances entre 2 dates données. Devant chaque item, on affiche le total de ses relances dans la période donnée. Deux autres indicateurs peuvent être visualisés : Le champ « Nombre de relances en cours > = nombre de cartes » permet de détecter une anomalie ou une éventuelle rupture. Le champ « Nombre de relances > = nombre de cartes dans le même jour » permet de donner une vision sur la régularité de flux. Plusieurs filtres sont proposés, par item, destination, par fournisseur, par quantité, par date de relance, par date de fin de production, par date de réception et par indicateurs.

2.5.3.2 Visualisations

L'objectif de cette fonction est d'extraire et d'afficher de la base de données des informations sur les relances en cours. La fonction affiche les informations concernant les relances en cours (item, destination, fournisseur, quantité, date de relance). Elle affiche aussi le nombre de retard de chaque item en fonction de sa date de relance et de son temps de cycle théorique. Le nombre de jours ouvrés entre la date de relance et la date du jour - le temps de cycle de l'item constitue le retard affiché.

2.5.3.3 Graphe des relances et retards

L'objectifs de ces deux graphes est d'offrir des informations pertinentes et rapides quant à la situation de toutes les relances (encours et en retards). L'utilisateur choisit deux dates et l'unité de base (jour, semaine ou mois), ce qui donne 3 graphes.

Sur une période choisie par l'utilisateur, on affiche le total des relances par unité de temps. La quantité totale des pièces relancées est affichée sur le même graphe

Les mêmes graphes sont réalisés pour visualiser les relances en retards. Les figures 80 et 81 illustrent bien ces différentes fonctions.

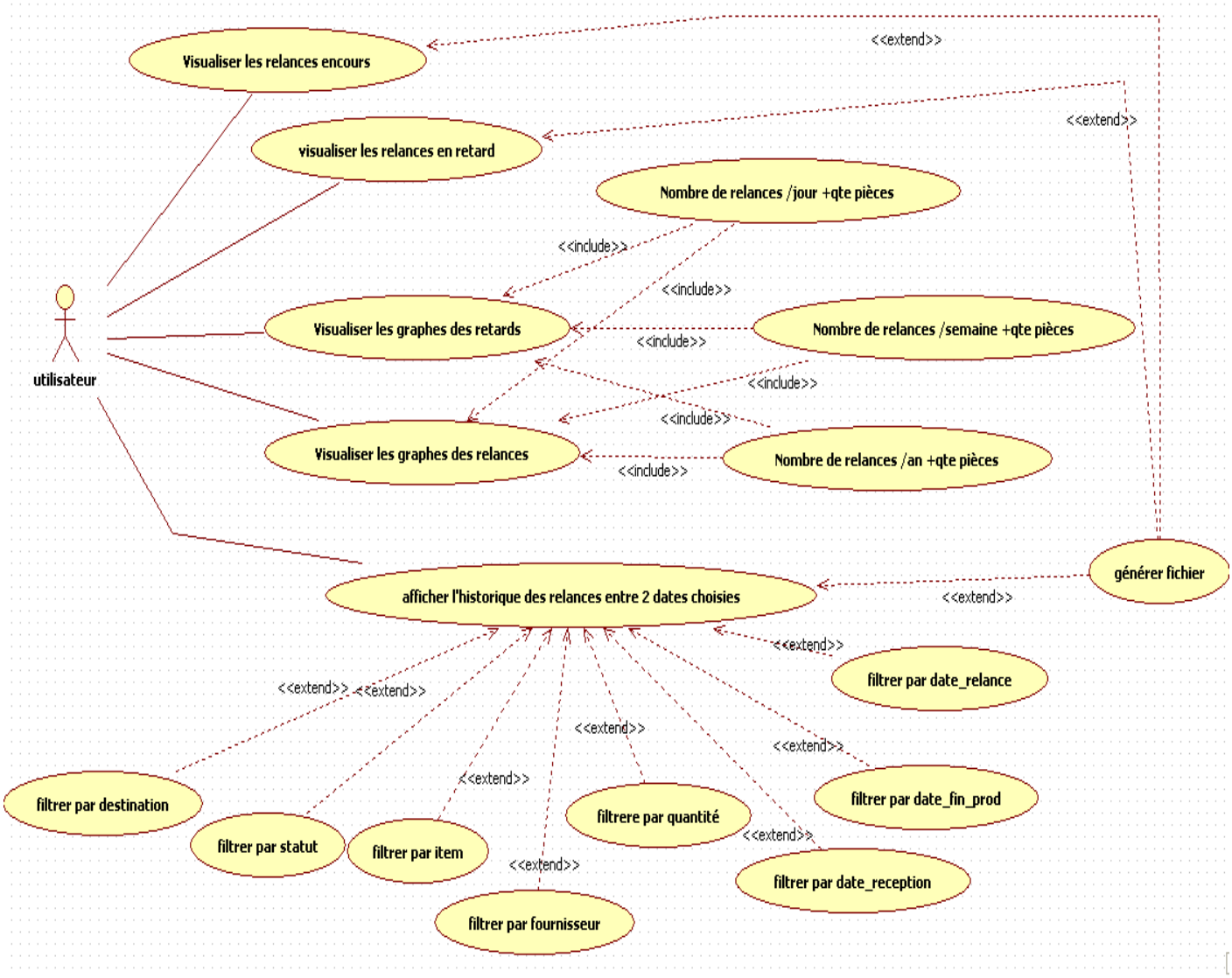


Figure 79 : Diagramme du cas d'utilisation (accès aux données de l'e-Kanban)

Figure 80 : visualisation des relances encours et des relances en retards

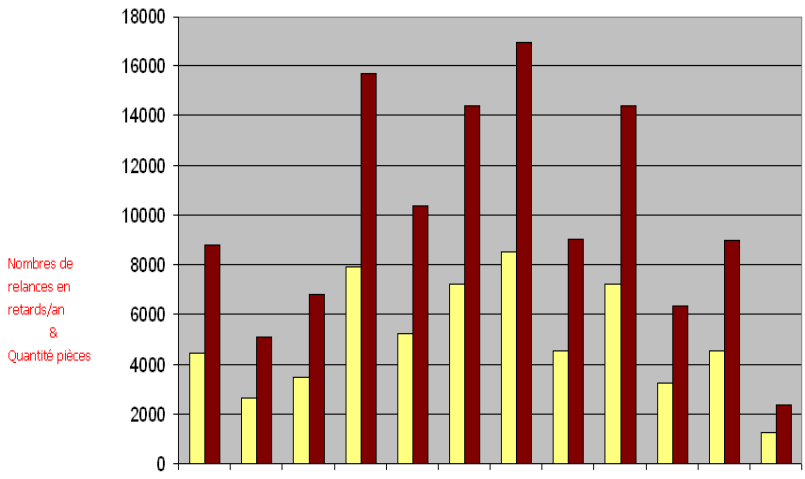


Figure 81 : les graphiques des relances en retards

2.6 *Hardware in the loop : validation du système de contrôle*

La validation du système de pilotage dans ce cas a été réalisée par des tests sur une base de données dédiée et par le déroulement de plusieurs scénarii manuellement. En effet, nous avons privilégié ce type de validation dans la mesure où notre objectif n'était pas de changer les règles de pilotage mais surtout assurer l'adéquation information / physique au niveau des points de synchronisation.

2.7 *Déploiement dans l'usine*

L'application a été déployée dans un premier temps pour gérer les Kanbans tôlerie de Golbey et les Kanbans tôlerie fabriqués pour Charmes. Plusieurs points de contrôles ont été installés dans les deux usines pour avoir une meilleure visibilité sur les encours.

2.8 *Retours sur expériences*

Cette application est aujourd'hui utilisée par les différents acteurs de la chaine logistique (Charmes/Golbey) pour visualiser les flux matières tôlerie entres les deux usines, pour optimiser les demandes, pour détecter les anomalies sur le flux et, surtout, elle est utilisée comme un moyen de communication efficace entre les deux sites.

Aujourd'hui l'application est déployée sur tous les composants fabriqués de Charmes et de Golbey (mousse, cuivre), ainsi que sur les composants achetés de Golbey (dans ce cadre nous avons utilisé le « e-Kanban » pour la gestion des mouvements de stock entre le magasin et l'atelier et pour l'optimisation des déplacements des « RUNNERS »).

Avec cette application, nous avons pu mesurer différents types de gains : des gains directs et des gains indirects que nous présenterons synthétiquement dans les sections suivantes.

2.8.1 *Les gains directs*

Les gains directs sont les gains que nous avons obtenus en éliminant les tâches à non valeur ajoutée (les différentes saisies) et en améliorant le processus d'impression ainsi que le processus d'imbrication. Le premier tableau montre l'analyse que nous avons effectuée sur la réduction des temps de suivi des boucles Kanban. Le deuxième tableau explique la réduction effectué dans le traitement des cartes Kanban. Le troisième tableau regroupe tous ces gains en minutes puis en coût.

Process:	Temps (Avant)	Aujourd'hui
Imbrication	15min/20 étiquettes	Golbey 2min /Charmes 1min
Saisie hebdomadaire	Entre 1h et 30min	Pas de saisie
Recap des retards 2 fois par jour	15/30 min	Pas de récap
Enregistrement sous Excel	10Min	Pas d'enregistrement
Contrôle + état d'avancement (Golbey)	~ 20min	Pas de contrôle physique
Contrôle physique	~ 20min	Pas de contrôle physique
Envoi de demandes	2 min par envoi (5 envois)	3 envois

	Nombre de cartes							
	Decembre	Janvier	Février	Moyenne	Par J	Temps passé	e_Kanban	Gain à l'imbrication
Charmes	406	738	499	547,7	27,4	20,5	2,7	17,8
Golbey	688	1021	P	854,5	42,7	32,0	1,1	31,0

Process Concerné	Gain Par Jour
Imbrication	48,77
Saisie hebdomadaire	9
Recap des retards	22
enregistrement sous Excel	10
Contrôle + état d'avancement (Golbey)	20
Contrôle physique	20
Reporting	5
Envoi de charmes	6
Amélioration du process impression	15
Amélioration du process impression Charmes	4
Total	159,7748

19493 €/an

Tableau 6 : présentation des gains directs

2.8.2 *Les gains indirects*

S'ajoute à ces gains directs, des gains que nous appelons indirects pour deux raisons : la première concerne les gains relatifs à l'amélioration de la qualité produits ou processus que nous ne pouvons pas mesurer directement sur le flux, la deuxième concerne les gains obtenus en processus grâce à la visibilité résultante de la mise en place de notre système « e-kanban » et à l'amélioration de la communication entre les sites qui en découle.

D'une part, les gains relatifs à la qualité sont obtenus essentiellement grâce à une meilleure gestion des indicateurs de révision. Ces indicateurs signalent les changements au niveau des attributs d'un produit ou de sa gamme. L'application développée permet de délivrer le dernier indice de révision en temps réel en fonction de l'article identifié, ce qui

contribue à l'amélioration de la qualité au niveau produit et à la réduction des perturbations au niveau processus.

Par une identification automatique de la carte Kanban, nous assurons que la demande de fabrication corresponde bien au lot d'articles demandés. Enfin, l'unification des sources de données a également aidé à améliorer la qualité (une seule base de données basée sur l'ERP pour gérer les Kanbans au lieu de plusieurs bases locales (Excel, Access)).

D'autre part, grâce à une meilleure visibilité, la communication entre les deux sites a été améliorée et les encours ont été réduits de 10%. Les analyses ont montré une amélioration des taux de rotation des Kanbans : nous somme passé de 3.6 rotations en janvier à 2.39 au mois d'août. Nous pouvons aussi observer que la déviation est réduite, on se dirige donc vers une production plus linéaire (d'une déviation de 3,082 à 1,613).

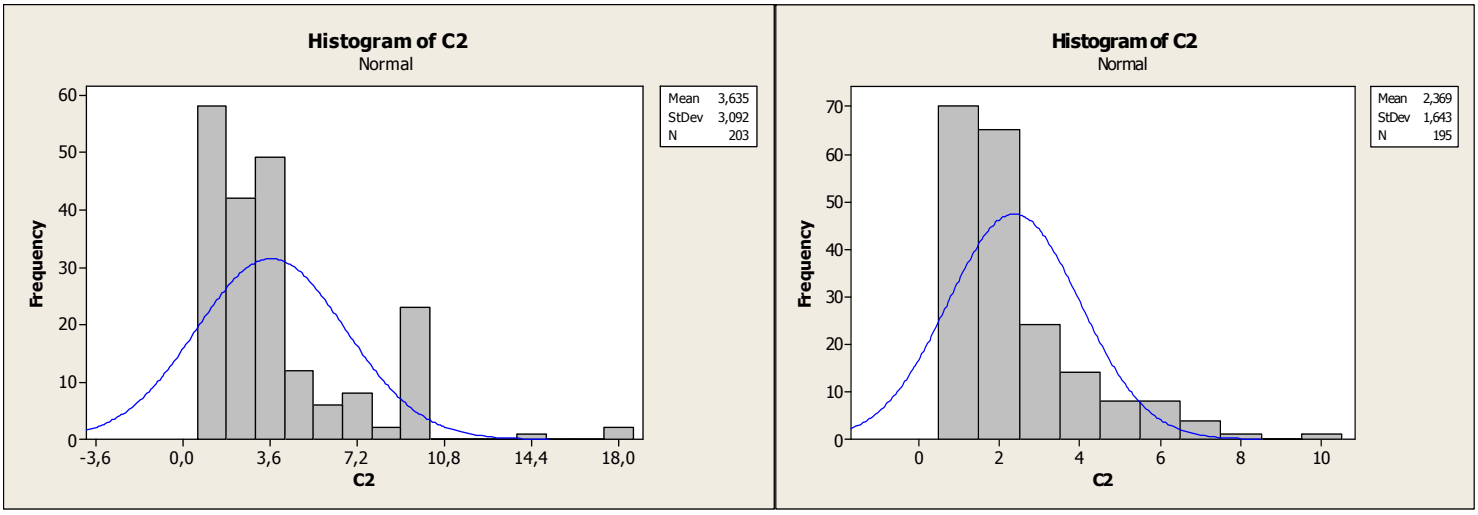


Figure 82 : Analyse du mois de janvier et le mois d'aout

Le diagramme suivant montre l'évolution des quantités. Nous observons, en dehors de la zone du pic, une nette diminution de la quantité des articles demandés entre Charmes et Golbey (voir la figure 85). Par conséquent les encours sont diminués d'approximativement 10%(reste à confirmer cette tendance sur plus de mois).

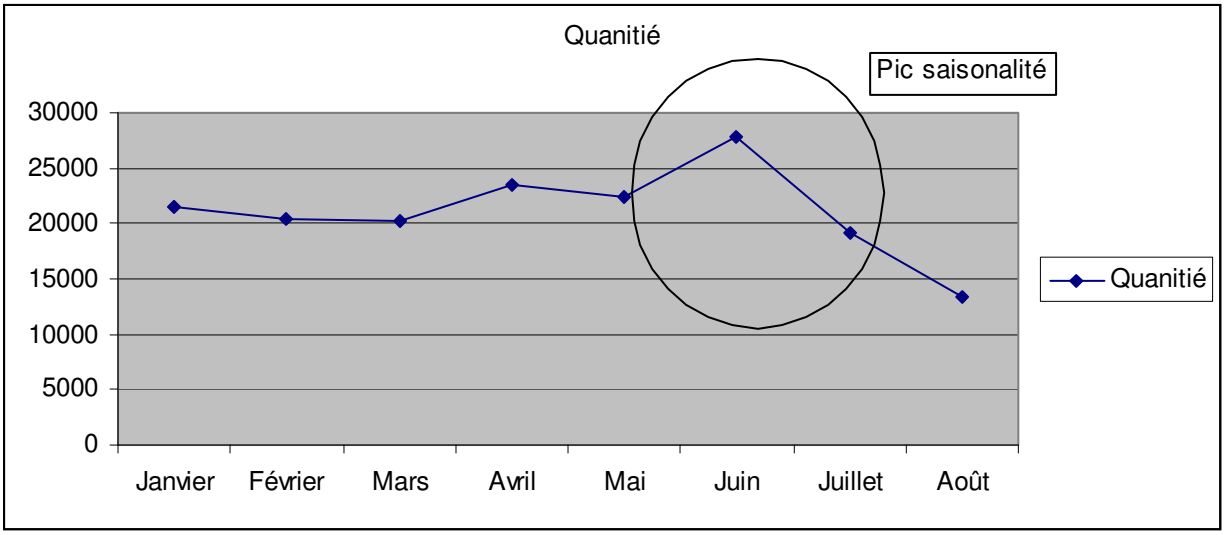


Figure 83 : l'évolution de la quantité d'articles demandée par Charmes

Notre méthodologie nous a permis de concevoir et d'implémenter un système de type SCP permettant de résoudre les deux problèmes cités précédemment (visibilité et synchronisation des flux physiques et d'informations) grâce à la mise en place d'un système d'informations temps réel qui trace l'évolution des Kanbans dans l'usine ainsi que les événements terrain.

Cependant, comme l'a montré un audit du système actuel cette synchronisation ne constitue qu'un préalable pour résoudre la synchronisation des flux physiques/physiques. En effet, il réside un certain nombre de difficultés dans les processus de planification et de gestion de la capacité de la cellule Front-End. Celles-ci induisent des problèmes d'assurance de disponibilité et de régularité de la matière lors de la livraison des composants sur les lignes d'assemblage. Il a été, par ailleurs, démontré que ces difficultés sont aussi corrélées aux problèmes de flux de ces dernières (qui dérèglent donc les plannings établis en amont). Par conséquent, nous pensons développer dans le futur un modèle d'émulation qui sera lié à la fois à l'application e-Kanban (les données dynamiques) et à un modèle d'optimisation.

3. DISCUSSION ET CONCLUSION DU CHAPITRE 5

Ce chapitre nous a permis de valider notre approche par diverses applications relevant de deux modes de pilotage de l'entreprise (Kanban et NrKanban). Ces expérimentations ont permis d'apporter une preuve tangible de faisabilité et de pertinence du concept SCP au travers des résultats chiffrés ou qualitatifs obtenus (par exemple, gain 142k€ pour NRKanban, gain de 20k€ et réduction des encours 10% pour le Kanban).

Par ailleurs, le déploiement de la méthode sur quatre cas d'applications constitue un élément de validation crédible. A travers notre contribution, ces premières expériences posent les bases d'une approche méthodologique complète et semi-formelle pour l'intégration d'un SCP dans un contexte industriel. Rappelons que notre objectif n'était pas de proposer un modèle générique d'un SCP avec une étude approfondie du degré d'hybridation des décisions centralisées vs distribuées, mais plutôt de dégager les concepts et les infrastructures nécessaires à sa mise en œuvre et à son déploiement.

Ces applications ont cependant mis en évidence quelques limites méthodologiques et d'autres relatives aux outillages développés :

- Dans le cas d'application Kanban, il est difficile de mettre en œuvre les étapes Software in the loop et Hardware in the loop. En effet, la construction d'un modèle de simulation nécessite une grande connaissance des flux et la disponibilité de données fiables issues du terrain qui n'existent pas dans un tel système (fonctionnant en « boite noire »).
- Dans le cas de la simulation de la synchronisation de flux physiques et d'informations (aspect synchronique) pour laquelle les points de synchronisation sont connus à l'avance, l'utilisation de la simulation peut être discutable notamment au regard des résultats que l'on pourrait obtenir par de simples tests.

Par ailleurs, les modèles de simulation développés auraient pu être d'avantage exploités notamment par un plan d'expériences mettant en œuvre plus de scénarii et montrant les impacts directs sur les indicateurs de performance définis ainsi que leurs interactions. Néanmoins, rappelons que notre objectif n'était pas de faire la preuve du concept SCP comme dans les thèses de (Pannequin R., 2007) et celle de (Klein T., 2008) mais de proposer une méthodologie d'intégration de celui-ci.

Pour répondre à ces limitations, notre méthodologie est nécessairement destinée à évoluer et à s'étendre mais, avec les bases conceptuelles et techniques proposées, nous pouvons poursuivre le déploiement sur les deux sites vosgiens ainsi que sur les autres sites du groupe.

VI Conclusion générale

Dans ce contexte de décisions hybrides, nous avons eu comme objectif de proposer une approche méthodologique générique permettant de concevoir des systèmes de pilotage contrôlés par le produit qui s'intègrent dans un environnement industriel de juste à temps. Il s'agit de prendre en compte, en ligne, les informations portées par le produit ou par une entité du système physique (un Kanban par exemple) afin d'améliorer la synchronisation des divers flux.

Nous avons montré, en particulier, que les différents modes de pilotage MRPII et le juste à temps (DFT notamment) pratiqués dans l'entreprise TRANE, induisent des problèmes de synchronisation de flux physiques, d'une part, et de flux physiques avec les flux d'informations, d'autre part. En effet, pour les premiers, il est très difficile de garantir une bonne synchronisation entre la ligne et ses feeders sans une utilisation de stocks temporaires qui, dans notre cas, est très préjudiciable (gros volumes, coûts élevés, grande variabilité de produits). Les seconds proviennent, entre autres, de l'inertie induite par les horizons et périodes des différents niveaux de décisions.

Pour répondre à cette problématique, nous nous sommes d'abord intéressés aux différents modes de pilotage étudiés dans la littérature. Cette étude nous amené à poser comme hypothèse que le pilotage par le produit contribue à répondre aux problèmes de synchronisation de flux. En effet, l'association « physique/information » est rendue crédible par ce dernier par le fait de la synchronisation, théoriquement parfaite, des flux physiques et des flux d'informations par la technologie Auto-ID embarquée par le produit. Ce qui favorise la synchronisation des flux physiques grâce à une visibilité accrue du terrain et à un système hybride d'aide à la prise de décisions pour leur pilotage. Ainsi la conception et l'intégration d'un SCP dans un contexte industriel a constitué l'objet principal de cette thèse.

Les résultats de ces travaux concernent :

- La proposition d'une méthodologie en réponse à la nécessité de déployer un tel système dans les usines du groupe tout en assurant la généricité des outils et solutions proposés et le suivi de projet grâce à des indicateurs de performances.
- L'évaluation de la pertinence à l'échelle industrielle du concept SCP par comparaison entre les résultats observés sur le flux (en simulation ou réel) et les indicateurs de performances retenus dans la méthodologie.

D'un point de vue méthodologique, une des originalités de notre approche est de piloter le projet de conception par des indicateurs issus des besoins des utilisateurs. Il s'agit, d'enrichir les approches Ingénierie Système de type six-sigmas par la simulation événementielle ce qui permettra, dans un premier temps, de concevoir l'architecture d'un SCP la plus pertinente au regard des indicateurs de performance retenus et, dans un deuxième temps, de valider a priori l'intégration du SCP ainsi conçu dans son environnement. Ceci nous a conduit à adapter les modèles de simulation en intégrant des modules qui regroupent à la fois des entités logiques et des entités physiques pour prendre en compte les contraintes relatives à une décision distribuée. Un ensemble d'outils permettant la génération automatique des modèles de simulation par instanciation à partir d'un modèle de connaissance dans un environnement DFT a été développé pour supporter notre approche.

Par ailleurs, sans considérer que le retour sur expérience et les résultants chiffrés de l'intégration des SCP dans l'entreprise TRANE constitue une preuve de concept, ils contribuent néanmoins à la validation de la pertinence de ces nouveaux systèmes de pilotage à l'échelle industrielle. En particulier l'application « e-kanban » nous a permis de chiffrer des gains directs de l'ordre de 20k€ (annuel) sur les coûts de saisie et environ 10% sur le niveau d'en-cours moyen grâce à un meilleur équilibrage de la demande entre les deux sites Charmes à Golbey.

Cependant, même si ces résultats s'avèrent encourageants tant sur le plan des outils d'ingénierie permettant de construire un système contrôlé par le produit répondant au mieux aux attentes des utilisateurs, que sur la pertinence de ces systèmes, une formalisation de notre approche pourrait être envisagée. Cette formalisation généraliserait nos travaux, afin d'identifier les architectures de simulation ainsi que les mécanismes de synchronisation génériques entre les modèles hétérogènes de simulation (modèles événementiels, modèles multi-agents, modèles logiques basés sur des heuristiques, …) à l'aide de techniques telles que HLA et les modèles DEVS (Pujo P., et al., 2007). En particulier, nous avons fait le constat à travers les applications développées que la résolution des problèmes de synchronisation des flux physiques ne peut s'obtenir que via une synchronisation des flux physiques et des flux d'informations.

En dernier lieu nous pouvons observer que les règles de décisions locales implantées dans les entités autonomes reflètent le comportement des opérateurs et ne recherchent pas d'optimalité. En effet, pour la première problématique qui concerne la synchronisation des flux de la ligne principale avec ceux de plusieurs lignes d'approvisionnement, la simulation permet de proposer une aide à la décision mais ne permet pas d'optimiser la manière de réaliser cette synchronisation (séquencement, niveau de stock, etc…). Ce problème relève de l'équilibrage de lignes d'assemblage (ALB) avec la particularité de considérer des feeders et

des ressources mobiles (opérateurs). Pour ce type de problèmes, plusieurs revues de la littérature ont été suggérées, nous citons (Buxey G., et al., 1973.), (Ghosh S., 1989) et (Scholl A., 2006). Plus récemment, une classification des problèmes de type ALB est proposée dans (Boysen A.,et al., 2006).Cette étude révèle le gap existant entre les problèmes considérés dans le monde académique et ceux qui se posent dans la réalité industrielle. (Hypothèses très restrictives).

Par ailleurs, les divers travaux de la littérature, visent à résoudre des problèmes hors-ligne c'est-à-dire sans la prise en compte d'événements liés au fonctionnement du système en temps réel (Artigues C. and Roubellat F., 2001) suggèrent une approche temps réel pour les problèmes d'ordonnancement d'ateliers travaillant à la commande. Une des pistes que nous pensons prometteuse est donc d'intégrer les informations portées par le produit dans une telle approche pour déterminer l'ordre de passage des produits dans un atelier, d'une part, et de synchroniser des lignes d'assemblage en présence de lignes d'approvisionnement, d'autre part.

L'avancement de ces travaux a été régulièrement publié lors de congrès nationaux et internationaux et ont fait l'objet de deux revues. Ils sont cités en référence dans ce document.

VII Bibliographie

Al-Ahmari A.M.A., Ridgway K. . (1999). An integrated modeling method to support manufacturing system analysis and design. . *Computers in Industry* , 38, pp. 225-238.

Anglania A., Griecoa A., Pacella M., T.Toliob. (2002). Object-oriented modeling and simulation of flexible manufacturing systems: a rule-based simulation. *Practice and Theory* , 209-234.

Anthony R.N. (1965). *Planning and Control Systems : a framework for analysis.* Harvard University Press.

Antony J., Banuelas R. (2002). Key ingredients for the effective implementation of six sigma program. *Measuring Business Excellence* , 20–27.

APICS. ((1997)). *APICS Dictionary.* 8th edition – APICS Edition, Atlanta.

Artigues C. and Roubellat F. (2001). *Ordonnancement d'ateliers en temps réel : Ordonnancement de la production.* Paris: Hermes Science Publications.

Artigues C., Billaut J-C., Esswein, C. (2005). Maximization of solution flexibility for robust shop scheduling. *European Journal of Operational Research* , 165(2):314–328.

Baïna S. and Morel G. (2006). Product Centric Holons For Synchronisation And Interoperability In Manufacturing Environments. *The 12th IFAC Symposium on Information Control Problems in Manufacturing.* St-etienne, France.

Baina S. (2006). *Interopérabilité dirigée par les modèles : une approche orientée produit pour l'interopérabilité des systèmes d'entreprise.* Thèse de doctorat, Université Henri Poincaré.

Bajic E., Chaxel F. (2002). Auto-id mobile information system for vehicle life cycle data management. *In IEEE International Conference on Systems, Man and Cybernetics* , volume 4, pages 6 pp. vol.4+.

Blanc P. (2006). *Pilotage par approche holonique d'un système de production de vitres de sécurité feuilletées.* Thèse de Doctorat, L'École Centrale de Nantes et l'Université de Nantes.

Bongaerts L., Monostori L., Mcfarlane D., Kadar, B. (2000). Hierarchy in distributed shop floor control. *Computers in Industry* , 43(2):123–137.

Boysen A., Fliedne N., Scholl M. (2006). A classification of assembly line balancing problems. *European Journal of Operational Research* , vol. 183, p. 674-693.

Brock David L. (2002). *The virtual Electronic Product Code.* Auto-Id Center White paper.

Bussmann S., and Schild, K. (2001). An Agent-based Approach to the Control of Flexible Production Systems. *At the 8th IEEE Int. Conference on Emerging Technologies and Factory Automation (ETFA 200), pp. 169 – 174. Antibes Juan-les-pins, France, 2001.*

Buxey G., Slack N. D., Wild N. (1973.). Production flow line system design-a review. *AIIE Transactions* , vol. 5, p. 37-48.

Cardin O. (2007). *Apport de la simulation en ligne dans l'aide à la décision pour le pilotage des systèmes de production – application à un système flexible de production.* Thèse de Doctorat, l'Université de Nantes.

Caux C. (2006). *Rationalisation des flux dans les systèmes de production.* HDR, Université Blaise PASCAL, CLERMONT-FERRAND .

Cavalieri S., Macchi M., Valckenaers P. (2003). Benchmarking the performance of manufacturing control system : design principles for a web based simulated testbed. . *Journal of Intelligent Manufacturing* , 14(1):43–58.

Cea A. (2006). *Contribution à la Modélisation et à la Gestion des Interactions Produit-Processus dans la Chaîne Logistique par l'Approche Produits Communicants.* Nancy: Thése de doctorat, Université Henri Poincaré.

Chabrol M., Sarramia D., Tchernev N. . (2006). Urbain traffic systems modelling methodology. . *International journal of Production economics* , 99, pp. 156-176,.

Corbier F. . (1989). *Modélisation et émulation de la partie opérative pour la recette en plateforme d'équipements automatisés.* Thèse de Doctorat, Université de Nancy I.

Costanza, J. (1996). *Just-In-Time manufacturing exellence.* John Costanza Institute of Technology 3rd dition.

DAVID R. and ALLA H. (1992). *Petri Nets and Grafcet – Tools for Modeling Discrete Event Systems.* Prentice Hall.

De Swaan Arons H., Csaba Attila Boer. (2001). Storage and retrieval of discrete-event simulation model. . *Simulation Practice and Theory* , 8(8), pp. 555-576.

Doumeingts G. (2004). *Formation à la méthodologie GRAI.* Technical report, GRAISOFT.

Doumeingts G. (1984). *La méthode GRAI.* Thèse, Université de Bordeaux I.

Dupuy M. (2005). *Contributions à l'analyse des systèmes industriels et aux problèmes d'ordonnancement à machines parallèles flexibles :application aux laboratoires de contrôle qualité en industrie pharmaceutique.* Toulouse: Thése de doctorat, l'Institut National Polytechnique de Toulouse.

El Haouzi H., Pétin J-F, Thomas A. (2008). Design and validation of a product driven control system based on a six-sigma methodology and discrete event simulation. *Special issue of Production Planning and Control* , has been accepted.

El Haouzi H., Pétin J-F., Thomas A. (2008). Simulation as a support of design and validation of a product driven control system. *IFAC WorldCongress.* Seoul -Korea-.

El Haouzi H., Thomas A., Pétin J.F. (2008). Contribution to reusability and modularity of manufacturing systems simulation models: Application to distributed control simulation within DFT context . *International Journal of Production Economics* , Volume 112, Issue 1, March 2007, Pages 48-61.

El Haouzi H., Thomas A. . (2005). A Methodological Approach to Build Simulation Models of Manufacturing Systems with Distributed Control. *International Conference on Industrial Engineering and Systems Management.* Marrakech, Morocco.

Ernani Vieira G. (2004). Ideas for modelling and simulation of supply chains with Arena. *Proceedings of the 2004 Winter Simulation Conference R .G. Ingalls, M. D. Rossetti, J. S. Smith, and B. A. Peters, eds.*

Frein Y. and Castelin E. (2001). *Ordonnancement sur une ligne multi modèle.* Chapitre 8 de Ordonnancement de la Production, Hermès.

Galland S. (2001). *Approche multi-agents pour la conception et la construction d'un environnement de simulation en vue de l'évaluation des performances des ateliers multi-sites.* Thèse de Doctorat, L'école Nationale Supérieure des Mines de Saint-Etienne et de l'Université Jean Monnet.

Garcia A., Mcfarlane D., Thorne A., Fletcher M. (2003). The impact of auto-ID technology in Materials Handling Systems. *7th IFAC Workshop on IMS.* Budapest.

Génin P. (2003). *Planification tactique robuste avec usage d'un APS. Proposition d'un mode de gestion par plan de référence.* Thèse de doctorat, Ecole des mines de Paris.

Génin P., Thomas A., Lamouri S. (2005). La planification avancée : les APS. *Techniques de l'ingénieur* , AG5120-ISSN12829072, 10 pages.

Ghosh S., G. R. (1989). A comprehensive literature review and analysis of the design, balancing and scheduling of assembly systems . *International Journal of Production Research* , vol. 4, p. 637-670.

Gourgand M. (1984). *Outils Logiciels Pour L'évaluation Des Performances Des Systèmes Informatiques.* Thèse de doctorat, Université Blaise Pascal, Clermont-Ferrand, France.

Gouyon D. (2004.). *Contrôle par le produit des systèmes d'exécution de la production : apport des techniques de synthèse.* Thèse Université Heri Poincaré.

Grabot B., Geneste L., Reynoso-Castillo G., Verot S. (2005). Integration of uncertain and imprecise orders in the mrp method. *Journal of Intelligent Manufacturing* , 16(2):215–234.

Heaven W. and Finkelstein A. (2004). A UML Profile to Support Requirements Engineering with KAOS. *IEE Proceedings -Software* , Vol. 151, pp. 10-27.

Hollocks B.W., Goranson H.T., Shorter D.N., Vernandat F.B. (1997). Key ingredients for the effective implementation of six sigma program. *Assessing Enterprise* , pp. 96-107, Springer-Verlag, Berlin.

Imai M. (1998). *Gemba Kaizen : l'art de manager avec le bon sens.* Éditions JV et DS.

Isermann R., Schaffnit, Sinsel. (1999). Hardware-in-the-loop simulation for the design and testing of engine-control systems. *Control Engineering Practice* , Vol. 7 , pp 643-653.

ISO/IEC62264. (2004). *enterprise–control system integration.* part 1. models and terminology, part 2. object models attributes, part 3. activity models of manufacturing.

Jacobs R. (1999). Evaluating Satisfaction with Media Products and Services: An Attribute Based Approach . *European Media Management Review, winter .*

Japan Institute of Plant Maintenance. ((1997)). *Introduction à la TPM. .* Usinor Institut Qualité et Management.

Joly A. (2005). *Etude de modes de fonctionnement réactifs et robustes aux aléas sur le flux de production d'une usine terminale automobile.* Thèse de doctorat, Institut National Polytechnique de Grenoble.

Karkkainen M. (2003). Increasing efficency in the supply chain for short shelf life goods using rfid tagging . *International Journal of Retail & Distribution Management* , 31(10):529–536.

Kellert P. and Force C. (1998). Méthodologie de Modélisation Orientée Objets de Systèmes de Production – Application à une Chaîne d' Etuvage de Bobines d'Allumage. *Journal Européen des Systèmes Automatisés* , 107-131.

Kellert P. and RUCH S. (1998). Méthodologie de Modélisation Orientée Objets de Systèmes de Production – Un Processus de Construction/Validation du Modèle Générique Orienté Objets d'un Système de Production. *Journal Européen des Systèmes Automatisés* , 51-105.

Klein T. (2008). *Le kanban actif pour assurer l'interopérabilité décisionnelle centralisé/distribué :Application à un industriel de l'ameublement.* Nancy: Thèse de Doctorat, Université Henri Poincaré.

Kosanke K. (1995). CIMOSA – Overview and status. *Computers in Industry* , Vol. 27, pp 101-109,.

Kosestler A. (1976). *The Ghost in the Machine.* Hutchinson & Co Ltd.,London, UK.

Lamouri S. (2006). *Synchronisation des prises de décisions dans une chaine logistique : robustesse et stabilité.* HDR, Supmeca, Paris.

Langton C. (1989). *Artificial Life.* Addison-Wesley.

Law A.and Kelton W. (1991). *Simulation modeling and analysis.* McGraw Hill.

Le Moigne J-L. (1992). *La modélisation des systèmes complexes.* Editions Dunod.

Lemesle R. (1998). Transformation Rules Based on Meta-Modelling. *EDOC '98*, (pp. 113-112). La Jolla, California.

Manset D., Verjus H., McClatchey R.,Ouendo F. (2006). A Formal Architecture Centric Model-Driven Approach for the Automatic Generation of Grid Applications. . *Proc of the 8th International Conference on Enterprise Information Systems ICEIS06.* Paphos, Cyprus.

Mcfarlane D., Sarma S., Chirn J. L., Wong C. Y., Ashton K. . (2003). Auto id systems and intelligent manufacturing control. *Engineering Applications of Artiflcial Intelligence* , 16(4):365–376.

Mellor S-J, Kendall S., Uhl A., Weise D. (2004). *Model Driven Architecture.* Addison-Wesley Pub co. ISBN 0201788918.

Minsky M. (1985). *The Society of Mind.* trad. Franç. 1988 : La société de l'esprit, InterEditions.

Monden Y. . (1983). *Toyota Production System.* Institute of Industrial Engineers Press, appendix2 p181-192 .

Morel G. (2004). *Modélisation des entreprises.* Cours DEA Production Automatisée de l'Université Henri Poincaré de nancy & l'école nationale supérieur de Cachon .

Morin E. (1977). *La Nature de la nature.* Tome 1 de "La méthode" Le Seuil, Nouvelle édition, coll. Points, 1981.

Muhl E. (2002). *Contribution à la vision globale de l'ordonnancement du flux véhicule : Vers un outil d'aide à la décision - Application pour un grand constructeur automobile.* Thèse de doctorat, Université Henri Poincaré - Nancy 1.

Nakajima S. (1989). *La maintenance productive totale (TPM) mise en oeuvre.* Editions AFNOr Gestion.

Nancy R. (1994). The Conical Methodology and the Evolution of Simulation Model Development. *Annals of Operations Research* , 1-45.

Naumenko A. and Wegmann A. (2003). Two Approaches in System Modelling and Their Illustrations with MDA and RM-ODP. *The 5th International Coinference on Entreprise Infrmation Systems -ICEIS 2003*, (pp. 398-402). Angers, France.

Nof S.Y., Morel G., Monostori L., Molina A. and Filip F. (2006). From plant and logistics control to multi-enterprise collaboration. *IFAC Annual Reviews in Control* , 30/1, 55–68.

Ohno T. (1988). *The Toyota Production System: Beyond Large-Scale Production.* Productivity Press Portland.

Ollero A., Morel G., Bernus P. (2002). From MEMS to Enterprise systems. *IFAC Annual Reviews in Control* , vol. 26(2),151-162.

Orlicky J. (1975). *Materials Requirements Planning.* USA McGraw-Hill.

Ortiz-Araya V. (2005). *Proposition d'un modèle de désagrégation pour un plan tactique stable dans le contexte des chaînes logistiques et de l'usage d'un APS.* Thèse de doctorat, Université Henri Poincaré.

Ounnar F., Pujo P., Mekaouche L., Giambiasi N. (2008). Integration of flat holonic from an HLA environment. *Journal of Intelligent Manufacturing* , ISSN 1572-8145.

Pannequin R. (2007). *Proposition d'un environnement de modélisation et de test d'architectures de pilotage par le produit de systèmes de production.* Nancy: Thèse Université Henri Poincaré.

Parlikad A-K., McFarlane D. (2007). RFID-based product information in end-of-life decision making . *Control Engineering Practice* , Volume 15, Issue 11, November 2007, Pages 1348-1363.

Pénalva J-M. (1997). *La représentation par les systèmes en situation complexe.* Thèse de doctorat, Université d'Orsay .

Petit P. (2003). Une révolution déclanchée par une puce. *Logistique magazine* , n° 179 Juillet-Aout.

Pierreval H., Caux C., Paris J.-L., Viguier, F. (2002). Evolutionary approaches to the design and organisation of manufacturing systems. *Computers & Industrial Engineering* , 44(3), 339-364.

Plossl W.G. (1993). *La nouvelle donne de la gestion de la production.* Afnor gestion, Paris.

Pugh S. (1996). *Creating Innovative Products Using Total Design: The Living Legacy of Stuart Pugh.* in Clausing, D., Andrade, R. (Eds), Addison-Wesley, Reading, MA, USA.

Pujo P., Pedetti M., Giambiasi N. (2007). Formal DEVS modelling and simulation of a flow-shop relocation method without interrupting the production . *Simulation Modelling Practice and Theory* , Vol. 14, pages 817–842.

Robinson S., Richard E., Nance R.E., Paul R.J., Pidd M., Simon J.E Taylor . (2004). Simulation model reuse: definitions, benefits and obstacles . *Simulation Modelling Practice and Theory* , 12 pps 479-494.

Roboam M. (1993). *La méthode GRAI : principes, outils, démarche et pratique.* Teknea.

Saint Germain B., Valckenaers P., Zamflrescu C., Bochmann O., Vanbrussel H. . (2003). Benchmarking of manufacturing control systems in simulation. . *In Proc. of the 3rd Int'l Workshop on Performance Measurement (IflP WG5.7)* , Bergamo, pages 357–369 .

Sargent R-G. (1986). *Issues in simulation model integration, reusability, and adaptability.* in: J.Wilson, J.Henriksen,.

Scholl A., B. C. (2006). State-of-the-art exact and heuristic solution procedure for simple assembly line balancing. *European Journal of Operational Research* , vol. 168, n° 3, p. 666-693,.

Selic B. (1998). Using UML for modelling complex real-time systems. *Lectures Notes in Computer Science* , 474, pp. 250-262, ISSN: 0302-9743.

Thomas A. (2007). *Cours de gestion de production.* EPINAL: ENSTIB-Université de Henri Poincarée.

Thomas A. (2004). *De la planification au pilotage pour les chaines logistiques.* HDR Université henri poincaré.

Thomas A., Klein T., El Haouzi H., Belmoktar S. (2008). Architecture de systèmes contrôlés par le produit pour un environnement en juste à temps. *MOSIM.* Paris.

Tranvouez E., Ferrarini A., Espinasse B. (2006). Cooperative disruption management in industrial systems : a multiagent approach. *In Dolgui A.,Morel G., Pereira, C. E., éditeurs : 12th IFAC Symposium on Information Control Problems in Manufacturing.* St Etienne, France.

Trentesaux D. (2008). Les systèmes de pilotage hétérarchiques : innovations réelles ou modèles stériles? *Journal Européen des Systèmes Automatisés* , 41(9), pages 1165-1202.

Trentesaux D. (1996). *Conception d'un système de pilotage distribué,supervisé et multicritère pour les systèmes automatisés de production.* Grenoble: Thèse l'Institut National Polytechnique de Grenoble.

US Air Force. (1998). *Integration computer aided manufacturing definition language (IDEF methods).*

Valckenaers P. (2001). Editorial of the special issue on holonic manufacturing systems. *Computers in Industry* , 46(3):233–234.

Valckenaers P., Cavalieri S., Germain B., Verstraete P., Hadeli, Bandinelli R., Terzi S., Van Brussel H. (2006). A benchmarking service for the manufacturing control research community. *Journal of Intelligent Manufacturing* , 17(6), pages 667-679.

Vega G. (2005). *Développement d'applications à grande échelle par composition de métamodèles.* Grenoble: Université Joseph Fourier.

Villeminot A. (2004). *Contribution à la modélisation et à la simulation des flux logistiques d'une usine terminale automobile.* Thèse de doctorat, Université Henri Poincaré - Nancy 1.

Vollmann T.E., Berry W.L. et Whybark C.D. (1997). *Manufacturing Planning and Control Systems.* McGraw-Hill.

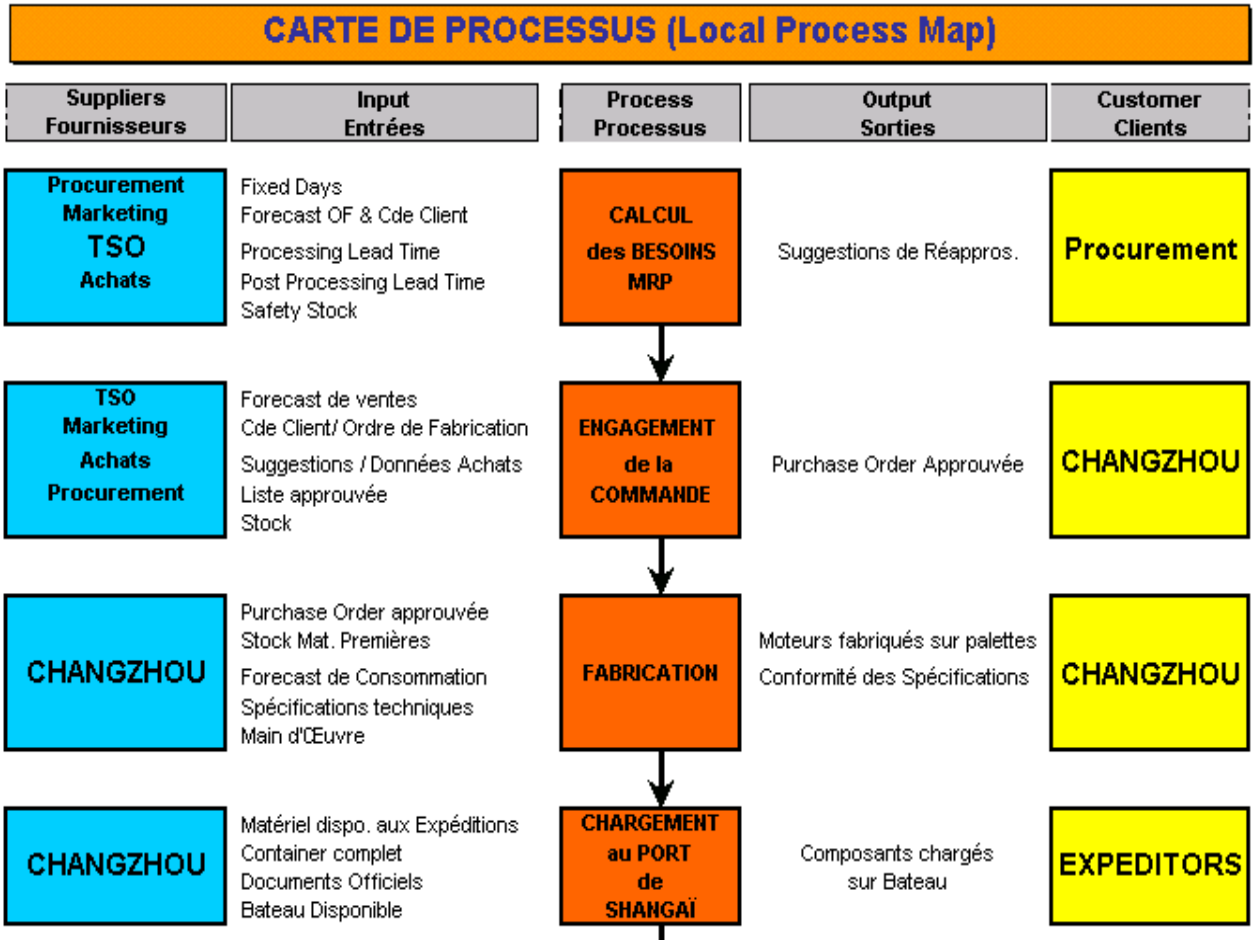
Wegner P. (1997). Why interaction is more powerful than algorithms. . *Communications of the ACM* , 40(5):80–91.

Wong C., McFarlane D., Ahmad Zaharudin A., Agarwal V. (2002). The intelligent product driven supply chain . *In IEEE int. conference on System Man and Cybernetic SMC'02.* .

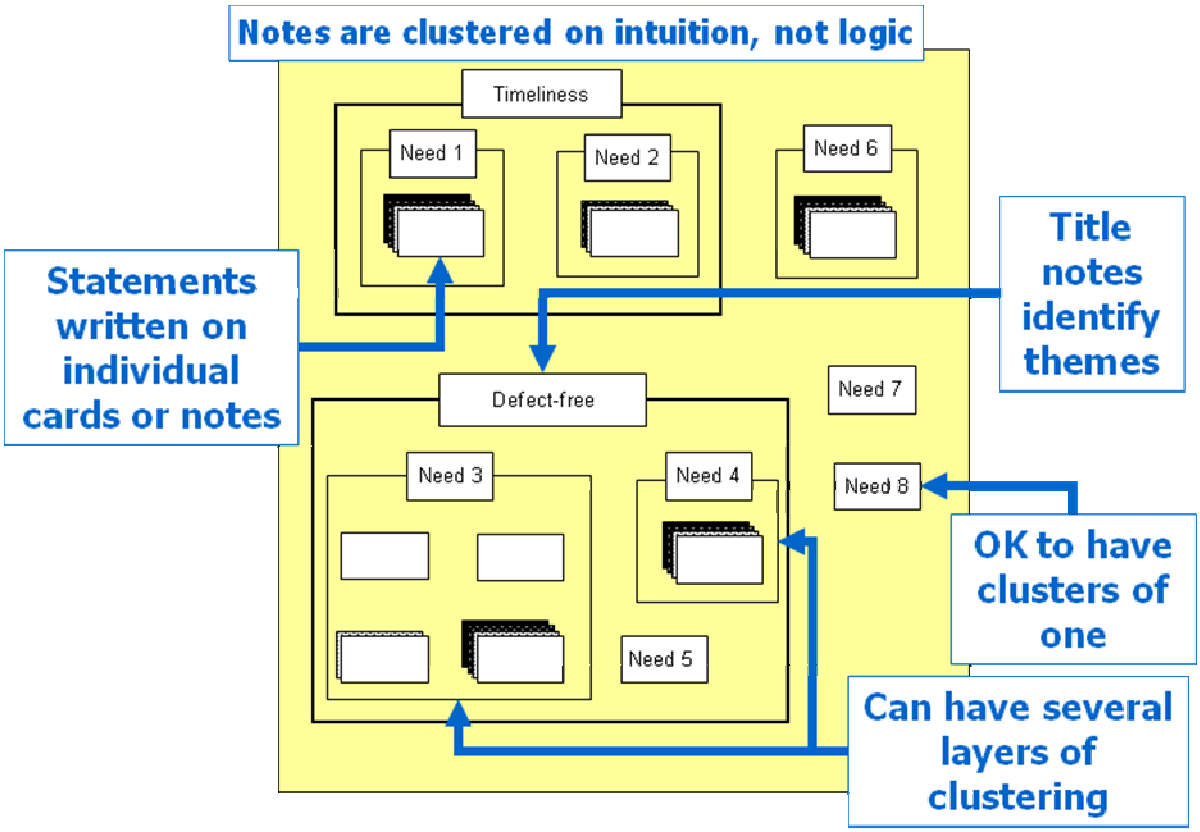
Zaîdi A. (1990). *QFD: une introduction.* Tec & Doc Lavoisier.

VIII Annexes

Annexe 1: Exemple d'un SIPOC



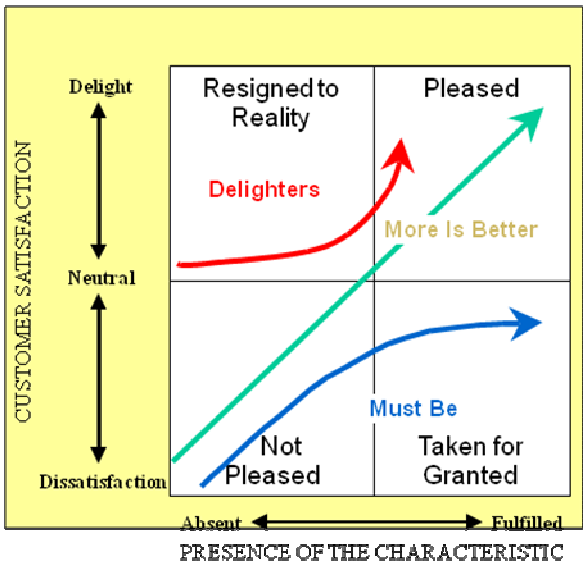
Annexe 2: Diagramme d'affinités



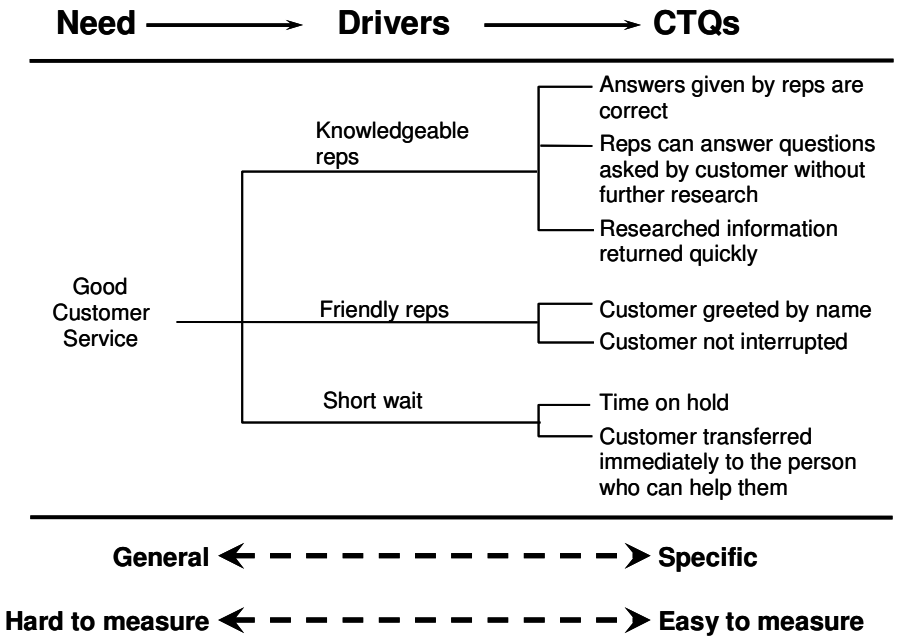
Annexe 3: Kano Model

The Kano Model

- "Must be" characteristics are generally taken for granted—unless they are absent!
- Customers *generally* discuss or bring up issues related to "More Is Better" characteristics.
- "Delighters" (Differentiators!) are generally not mentioned, since the customers are not dissatisfied with their absence.

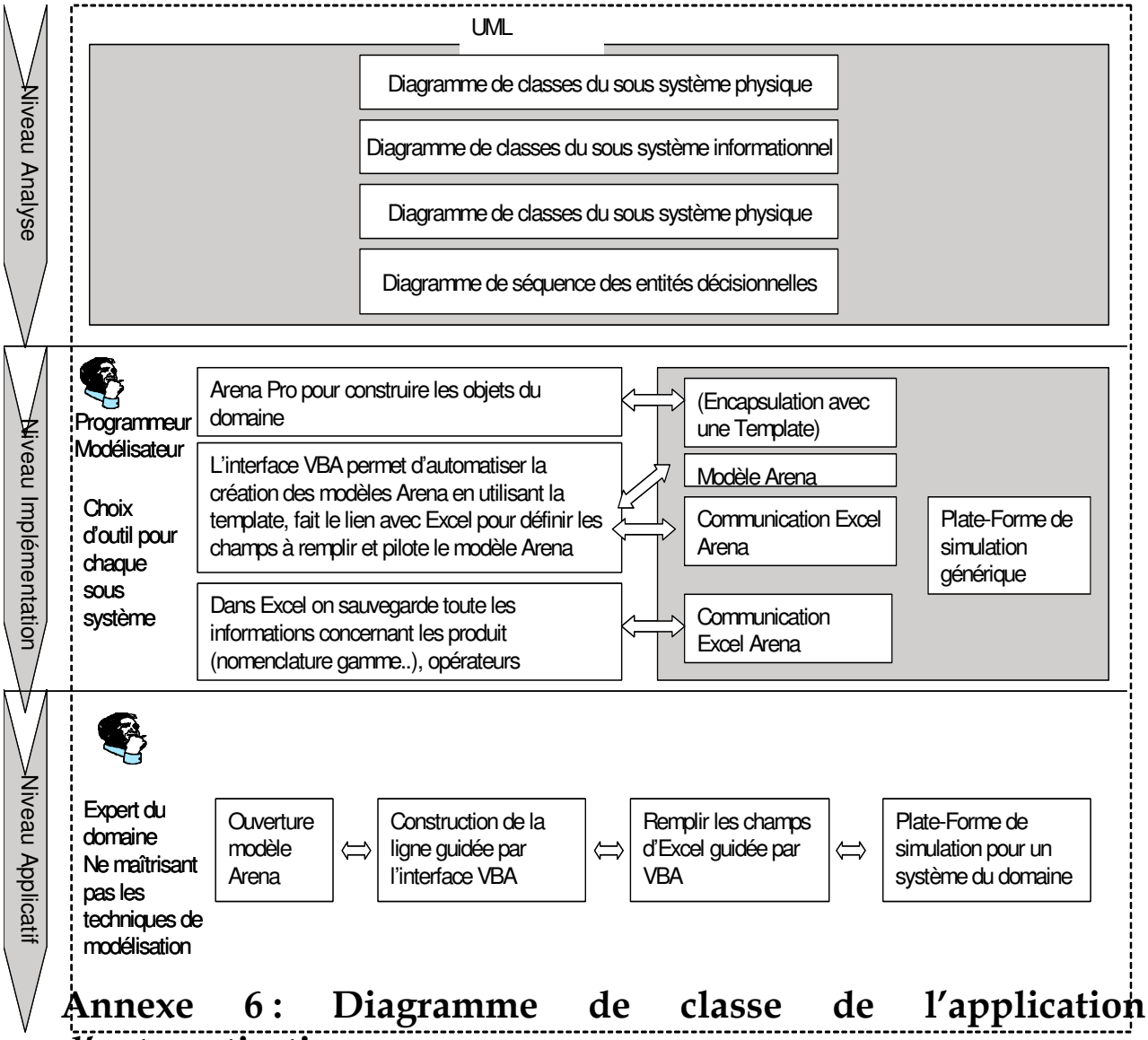


Annexe 4 : un exemple de l'arbre des CTQ

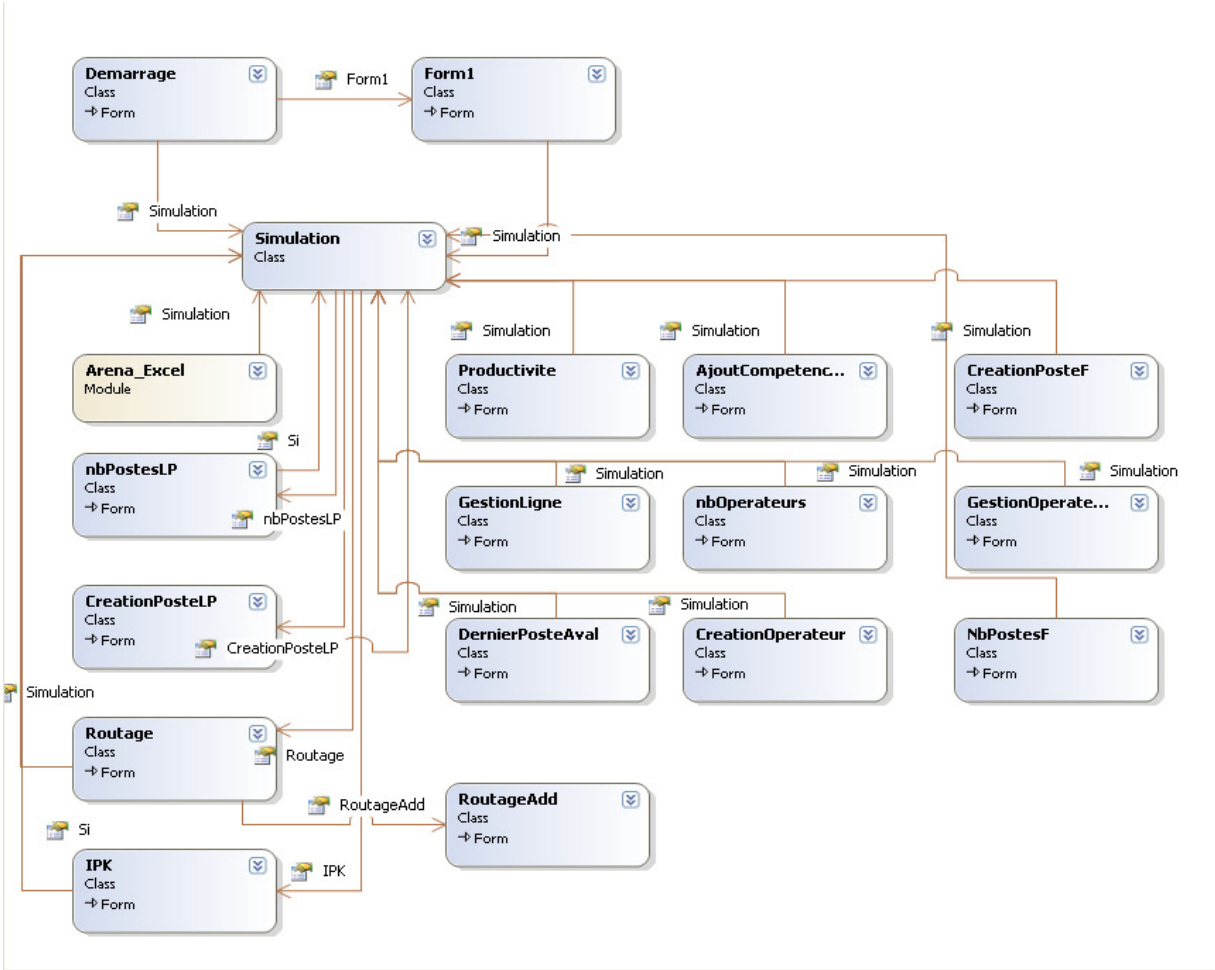


Annexe 5 : génération des modèles de simulation

La figure suivante résume la construction de la plateforme de simulation pour un système particulier à partir d'une plateforme générique du domaine des systèmes organisés en DFT. Nous distinguons trois niveaux d'abstraction : le niveau conceptuel qui utilise la théorie des systèmes de (Le Moigne J-L, 1992) et qui préconise d'étudier le système selon trois vues, pour ces trois vues on construit des modèles de connaissance grâce à des diagrammes de classe UML pour identifier les objets du système et des diagrammes de séquence pour décrire les comportements de ces objets. Le niveau opérationnel est consacré à l'implémentation de la plateforme générique à partir du modèle de connaissance développé au niveau conceptuel. Au niveau applicatif, l'expert de domaine crée une instance de la plateforme générique pour son système.



Annexe 6 : Diagramme de classe de l'application d'automatisation



Annexe 7 : description des tables du pilote TRANE FAN

La table **"TRN_BOM"** permet de stocker les nomenclatures ("Bill Of Material") avec les descriptions et quantités de composants à utiliser pour un poste et un ventilateur donné (identifié par un numéro de référence ("partnumber")). (objet « **Manufacturing Bill** » selon le standard S95 et sur les spécifications B2MML**).**

- La table "**TRN_SOE**" permet de stocker les "Sequence Of Events" avec une description des opérations à effectuer sur un poste dans un ordre donné. (« **Process segment** » selon le standard S95 et sur les spécifications B2MML**)**
- La table "TRN_CONCERNE" permet l'association d'une demande (numero_demande) et d'un ventilateur (partnumber) avec la quantité à réaliser, la quantité réalisée et la quantité en cours sur la ligne d'assemblage.
- La table "TRN_CYCLE_VENTILATEUR" enregistre les informations de traçabilité de chaque ventilateur monté (N° de lot du moteur, numéro d'hélice,…)
- La table "TRN_DEMANDE" permet de gérer les "Ordres de Fabrication" (OF) en provenance du site de Charmes et les "Ordres d'Achat" (PO : Purchase Order) en provenance du site de Golbey. Chaque demande est identifiée par un numéro de demande dont on connaît le statut (ouvert, clos...) et la date.
- La table "TRN_DEMANDEUR" permet de stocker les sites clients de la ligne d'assemblage (Golbey et Charmes).
- La table "TRN_LIGNE_ASSEMBLAGE" permet l'identification des lignes de fabrication avec une description et une localisation. Pour le moment, il n'y a qu'une ligne d'assemblage sur le site de Charmes mais cette table permet d'envisager la gestion d'une autre ligne de fabrication à partir de l'application.
- La table "TRN_OPERATEUR" permet d'identifier chaque opérateur susceptible de travailler sur la ligne. Les opérateurs sont identifiés par leur numéro de badge et on connaît les noms et prénoms.
- La table "TRN_POSTE" décrit chaque poste de la ligne d'assemblage.
- La table "TRN_VENTILATEUR" permet de stocker l'ensemble des ventilateurs pouvant être assemblés sur la ligne.
- La table "TRN_EST_HABILITE" permet de gérer les différentes habilitations des opérateurs sur chaque poste

Annexe 8 : description des principales pages web de l'application TRANE FAN

- Global.aspx : Coordonne les données entre les différents clients de l'application et sert de point central de l'application (Gestion des postes, sérialisation, génération du numéro de série TRANE).

- App_Code/Poste.vb : Classe qui représente un poste de travail et son état au cours du temps. On y trouve le numéro du poste, l'identifiant de l'opérateur connecté à ce poste, le numéro de série TRANE du ventilateur en cours de fabrication et enfin le numéro de sous opération en cours d'exécution.

- Condenseur.aspx : Page destinée à la ligne Feeder Condenseur. Elle permet aux opérateurs de cette ligne de lancer une commande en direct à la ligne TRANE FAN.

- CondenseurWait.aspx : Page qui empêche les opérateurs de la ligne Feeder Condenseur de scanner trop vite une nouvelle demande.

- Identification.aspx : Gestion de l'identification de l'opérateur sur son poste

- ListeOF.aspx : Accessible uniquement depuis le poste 1, permet à l'opérateur de choisir quelle demande il va lancer en premier, mais surtout dans quel ordre il va traiter les demandes de Golbey.

PagePoste.aspx : Principale page de l'application qui représente la page sur laquelle les opérateurs travaillent, et qui gère l'affichage dynamique des différentes informations dont l'opérateur a besoin.

Annexe 9 : la communication entre Arena et l'application WEB

Afin de valider le fonctionnement de l'application, des développements ont été effectués pour simuler le comportement de la ligne à l'aide d'un modèle Arena.

Communication Arena ➔ application

Envoi des données

La communication dans le sens Arena ➔ application permet d'émuler le scan des différents codes à barres.

L'application Arena envoie, via un socket les informations scannées (N° série TRANE, n° de lot du moteur,…).

La gestion du socket se fait grâce à la DLL et le TLB SocketClient, qui permet de manipuler les sockets de façon plus transparente.

Le code VBA du modèle Arena ne se contente que de créer le socket, puis d'envoyer à l'application les données, précédées du numéro du poste concerné (Ex. : 2 1234567891201).

XMLHttpRequest

À la réception des données d'Arena, l'application les stocke dans un tableau de 4 lignes (une pour chaque poste).

Chaque poste client interroge le serveur régulièrement (toutes les secondes), pour savoir s'il a reçu une nouvelle information (comparaison avec un tableau TMP). Cette interrogation se fait grâce à l'objet JavaScript XMLHttpRequest, comme le montre le code suivant :

```
var xhr_object = null;

function SendGetRequest() {
    var xhr_url = 'EssaiAJAX.aspx' + document.location.search + '&date=' + new Date(); //
Adresse de la page ASP qui va construire la réponse
        if ( window.XMLHttpRequest ) {
                // Objet XmlHttpRequest pour les moteurs GECKO
                xhr_object = new XMLHttpRequest();
        } else if ( window.ActiveXObject ) {
                // Objet XmlHttpRequest pour Internet Explorer
                xhr_object = new ActiveXObject( 'Microsoft.XMLHTTP' );
        } else {
                // Navigateur non-compatible
                alert( 'Votre navigateur ne supporte pas les objets XMLHTTPRequest...' );
                return;
        }
        // On ouvre la requête vers la page désirée
        xhr_object.open( 'GET', xhr_url, false);
        // On lui donne le pointeur de fonction de retour
        xhr_object.onreadystatechange = CallBackRequest;
        // On envoie la requête
        xhr_object.send(null);
}
```

La page **EssaiAJAX.aspx** sur le serveur construit alors la réponse qu'il va renvoyer au client. Celle-ci questionne la classe Global pour savoir si une nouvelle information est arrivée pour le poste demandeur (fonction **[Global].messagePoste(Request.QueryString("poste"))**). Si aucune nouveauté n'est détectée, le serveur renvoie la chaîne **-1**, sinon il renvoie la chaîne contenant l'information.

Le client récupère alors cette information et la traite avec le code suivant :

```
function CallBackRequest() {
        // Sur le retour de la requête, on teste son état
        if ( xhr_object.readyState == 4 ) {
                var toto = xhr_object.responseText; // Réponse du serveur

                if (toto!=-1) {
                    // On copie l'information dans le champ texte
                    document.getElementById('TextBox1').value = toto;
                    // On soumet le formulaire
                    document.getElementById('Form1').submit();
                } else {
                 setTimeout("SendGetRequest()",1000); // On recommence une seconde plus tard
            }
        }
```

Communication application ➔ Arena

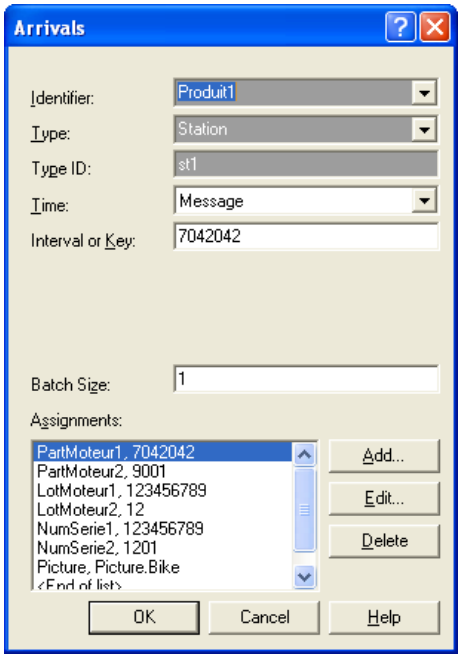
La communication dans le sens application ➔ Arena permet de signaler à Arena le lancement d'un ordre de fabrication.

Le lancement d'un nouvel ordre de fabrication est détecté dans la page PagePoste.aspx, avec le code suivant :

```
If Not Request.UrlReferrer Is Nothing AndAlso
Request.UrlReferrer.ToString.ToLower.Contains("listeof.aspx") Then
' Si la page précédente est la liste des OF
        Dim qteTmp = CType(quantite.GetInt32(0), String) ' Nombre de ventilateurs à faire
        Dim cpt As Integer
        If Not [Global].sock.connected Then
                [Global].sock.connect("localhost", 4334)
        End If
        Dim numSerieTRANE As String
        For cpt = 0 To qteTmp - 1
        ' Pour chaque ventilateur, on envoie à Arena les informations sur ce dernier (N° TRANE,
moteur,…)
                numSerieTRANE = ([Global].genererNumSerieTRANE("12345678912") + cpt)
                [Global].sock.send("7042042 9001 " & Left(numSerieTRANE, 9) & " " &
numSerieTRANE.Substring(9, 2) & " " & Left(numSerieTRANE, 9) & " " & Right(numSerieTRANE, 4) &
" Picture.Man")
        Next cpt
End If
```

Chaque attribut de l'entité doit être séparé par un espace. La première valeur est attribuée au premier attribut déclaré dans l'Arrivals d'Arena, la seconde valeur au second attribut, et ainsi de suite…

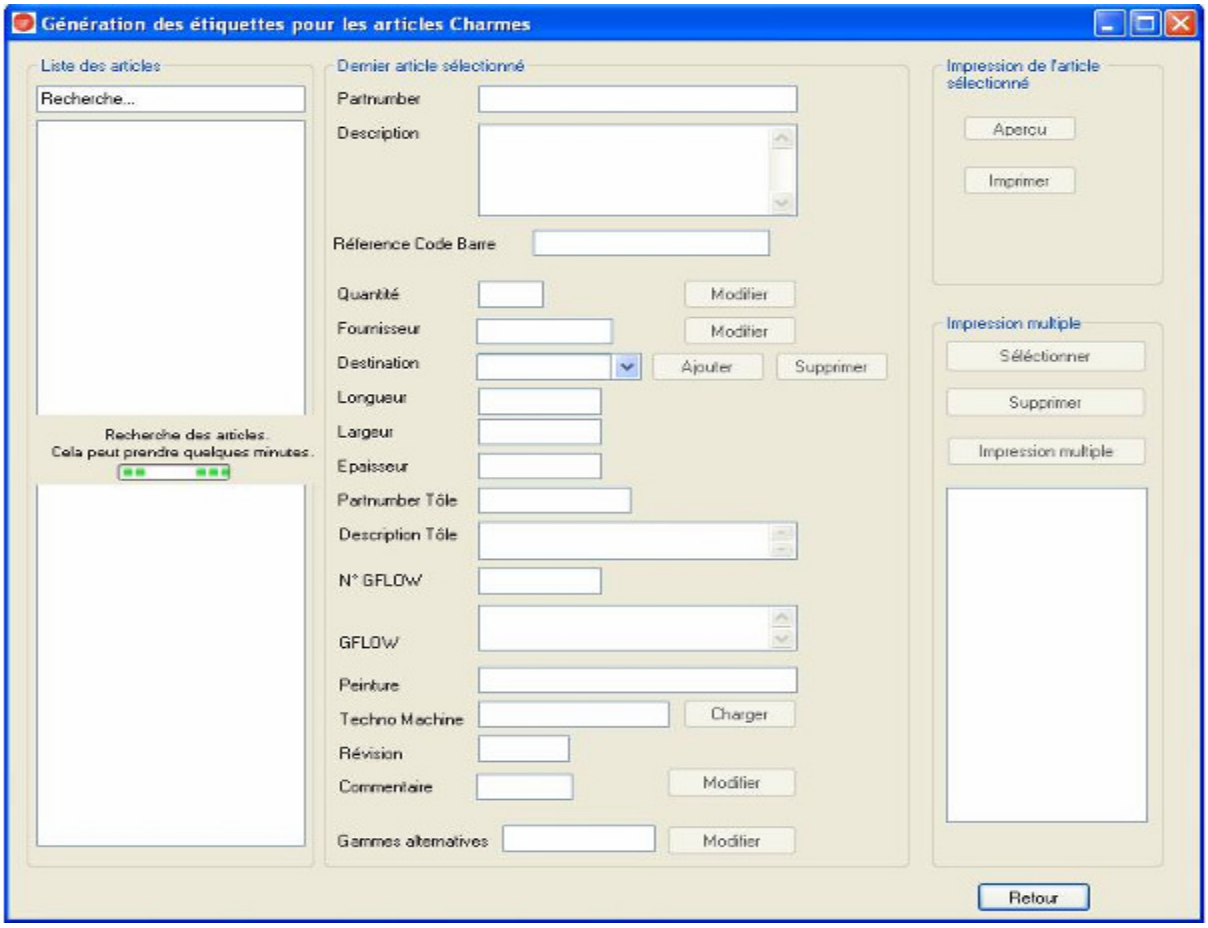
Le block Arrivals du modèle Arena doit contenir un produit paramétré pour être créé à la réception d'un message, comme le montre la figure suivante :



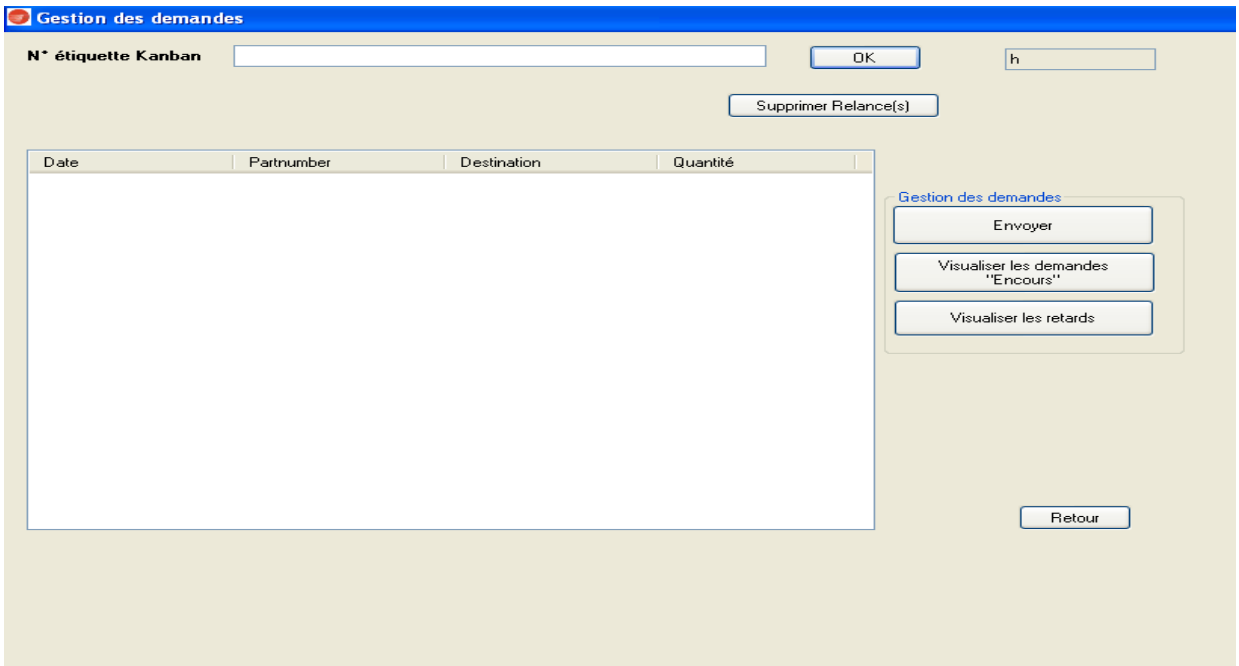
La valeur **Interval on Key** a la même valeur que le premier attribut de l'entité.

La déclaration d'un seul produit est suffisante. Arena créera des nouveaux articles tant qu'il recevra des messages.

Annexe 10 : les différentes captures d'écran des interfaces utilisateurs du « e-Kanban »



Interface utilisateur pour l'impression des étiquettes



Interface de gestion des demandes

Réceptions

Saisie des réceptions | OK | aa

Annuler réceptions

Date	Part	Destination	Quantité
03/05/2008 04:30:32	57088168001	L1 MNT A/C 2	128
04/12/2007 12:12:00	57159354001	L1 MNT CGWN	1
05/02/2008 12:10:15	57159281001	L1 MNT CGWN	8
06/03/2008 17:35:00	57159281001	L1 MNT CGWN	8
11/12/2007 03:40:13	57159281001	L1 MNT CGWN	8
16/11/2007 11:58:26	05140976001	SCEI	64
17/11/2007 03:51:54	57166971001	L2 MNT P3	16
20/11/2007 17:06:05	05140976001	SCEI	64
22/11/2007 16:58:42	05140976001	SCEI	64
27/11/2007 17:09:15	05140976001	SCEI	64
27/11/2007 17:09:36	05140976001	SCEI	64
30/11/2007 15:12:19	57190010001	L2 CDS VIS	30

Gestion des réceptions

Envoyer un accusé de réception

Retour

Interface de gestion de la réception

Encours

Items avec le statut " Encours"

ITEM	DATE_RELANCE	STATUT	FOURNISSEUR	DESTINATION	QUANTITY
57124839001	24/04/2008 04:07	E	211	L2 MNT G3	14
57092738001	24/04/2008 04:07	E	211	L2 CMP GP2	18
57097801001	24/04/2008 04:07	E	211	L2 FIN	150
57097817001	24/04/2008 12:15	E	211	L2 MNT P1	25
57097801001	24/04/2008 12:15	E	211	L2 FIN	150
57124829001	24/04/2008 12:16	E	211	L2 CDS TOLE	50
57082344001	24/04/2008 12:16	E	211	L2 CMP GP2	120
05140975004	24/04/2008 16:58	E	211	SCEI	32
57087026001	24/04/2008 16:59	E	211	SCEI	20
57087026005	24/04/2008 16:59	E	211	SCEI	20
57087026004	24/04/2008 17:00	E	211	SCEI	12

Recherche d'item

Rechercher

Item	Date de Relance	Destination	Quantité	Statut

Retour