

Volume 24, No. 7, 2003

Edited by / Édité par  
Walid Abdul-Kader  
University of Regina

***Production / Operations Management***  
***Gestion des opérations et de la production***

Proceedings of the Annual  
Conference  
of the Administrative Sciences  
Association of Canada,  
Production/Operations  
Management Division

Actes de Congrès annuel de la  
section Gestion des opérations et  
de la production de l'association  
des sciences administrative du  
Canada

Halifax, Nova Scotia  
June 14-17, 2003

Halifax, Nouvelle Écosse  
14-17 juin, 2003

Copies of these Proceedings may  
be ordered from:

Des exemplaires de ces Actes  
peuvent être obtenus auprès de:

Dr. Albert J. Mills  
Frank H. Sobey Faculty of Commerce  
Saint Mary's University  
Halifax, Nova Scotia B3H 3C3

Tel: 902-420-5778  
Fax: 902-420-5119  
Email: [albert.mills@smu.ca](mailto:albert.mills@smu.ca)

## ACKNOWLEDGEMENTS

These Proceedings of the ASAC 2003 POM division are the fruit of collaborative work of literally many people. The topics cover various aspects of Production and Operations Management, the papers address a large variety of Production and Operations techniques in more complex manufacturing and services businesses.

I sincerely acknowledge the contribution of the authors for submitting high quality papers, and the reviewers who accomplished a wonderful work in evaluating, and selecting the manuscripts for presentation and publication.

Sincerely,

**Walid Abdul-Kader**  
University of Regina

## REMERCIEMENTS

Les actes ici présentés sont le fruit d'un travail soutenu de collaboration de plusieurs personnes et volontaires. Les sujets présentés couvrent divers aspects de la gestion des opérations et de la production. Les communications qui y sont retenues, présentent des techniques s'appliquant à des domaines complexes dans l'industrie manufacturière et de service.

Je tiens à remercier les auteurs (es) pour la qualité des communications qu'ils (elles) ont soumises. Je tiens également à remercier les arbitres qui ont réalisé un excellent travail en évaluant et retenant les articles pour fins de présentation et publication dans ces actes.

Sincèrement,

**Walid Abdul-Kader**  
University of Regina

## REVIEWERS / ÉVALUATEURS

Mohamed Djerdjour

Isabel Dostaler

Claude Duguay

Ozhand Gangavi

Jean-Pierre Kenné

Vinod Kumar

Silvia Ponce

Jacques Renaud

Diane Riopel

Jacques Roy

André Tchokogué

State University of New York

Concordia University

École des Hautes Études Commerciales

Laurentian University

École de technologie supérieure

Carleton University

École des Hautes Études Commerciales

Université Laval

École Polytechnique de Montréal

École des Hautes Études Commerciales

École des Hautes Études Commerciales

## TABLE OF CONTENTS / TABLE DES MATIÈRES

### BEST PAPER AWARD - PRIX DU MEILLEUR TEXTE

#### **Solving Multi-Criteria Scheduling Flow Shop Problem Through the Compromise Programming Model ..... 1**

Anis Allouche, Université de Sfax, Tunisia  
Belaïd Aouni, Laurentian University, Canada  
Jean-Marc Martel, Université Laval, Canada  
Taïcir Loukil, Université de Sfax, Tunisia  
Abdelwaheb Rebaï, Sfax University, Tunisia

#### **Optimisation du transport de charges partielles: une application pratique ... 13**

Marie-Claude Bolduc, Université Laval, Canada  
Gilles R. D'Avignon, Université Laval, Canada  
Jacques Renaud, Université Laval, Canada

### HONOURABLE MENTION - MENTION HONORABLE

#### **Localisation d'entrepôts des autobus de transport urbain: le cas dy réseau de transport de la Capitale ..... 25**

Sébastien Bournival, Université Laval, Canada  
Fayez Boctor, Université Laval, Canada  
Jacques Renaud, Université Laval, Canada

#### **A framework for managing a new complex product development project: a case study approach ..... 36**

Vinod Kumar, Carleton University, Canada  
Rajendra P Mishra, Carleton University, Canada  
John Ajit Thomas, Carleton University, Canada  
Robert Gunn, Carleton University, Canada  
Uma Kumar, Carleton University, Canada

#### **Determinants of the Diffusion of Cross-Functional New Product Development Teams ..... 52**

Todd A. Boyle, St. Francis Xavier University, Canada  
Uma Kumar, Carleton University, Canada  
Vinod Kumar, Carleton University, Canada

#### **Managing organizational memory in ERP adoption projects using an OMIS: key issues and challenges ..... 61**

Bharat Maheshwari, Carleton University, Canada  
Vinod Kumar, Carleton University, Canada  
Uma Kumar, Carleton University, Canada  
Manjari Maheshwari, Carleton University, Canada

|                                                                                                                                   |            |
|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|------------|
| <b>The effect of quality management on purchasing performance and internal customer satisfaction, a structural model .....</b>    | <b>72</b>  |
| David Hemsworth, University of Toronto, Canada                                                                                    |            |
| Cristóbal Sánchez-Rodríguez, Wilfrid Laurier University, Canada                                                                   |            |
| <b>La démarche de la qualité totale dans des entreprises partenaires: étude exploratoire .....</b>                                | <b>91</b>  |
| Raoudha Kammoun, Sfax University, Tunisia                                                                                         |            |
| Habib Chabchoub, Sfax University, Tunisia                                                                                         |            |
| Belaïd Aouni, Laurentian University, Canada                                                                                       |            |
| <b>Les défis stratégiques de l'approvisionnement électronique .....</b>                                                           | <b>104</b> |
| André Tchokogué, HEC Montréal, Canada                                                                                             |            |
| Jean Nollet, HEC Montréal, Canada                                                                                                 |            |
| Loubna Boutaleb, HEC Montréal, Canada                                                                                             |            |
| <b>Planification d'une machine multitâche: une application pratique dans l'industrie de la chaussure .....</b>                    | <b>112</b> |
| François Bouchard, Université Laval, Canada                                                                                       |            |
| Jacques Renaud, Université Laval, Canada                                                                                          |            |
| Fayez Bector, Université Laval, Canada                                                                                            |            |
| <b>Performance evaluation of series-parallel production line .....</b>                                                            | <b>122</b> |
| Steven Noseworthy, University of Regina, Canada                                                                                   |            |
| Walid Abdul-Kader, University of Regina, Canada                                                                                   |            |
| <b>ABSTRACT/ RESUME</b>                                                                                                           |            |
| <b>The Emerging Interdisciplinary field of E-Commerce: Highly-cited Documents, Authors and Journals (Oral Presentation) .....</b> | <b>137</b> |
| Hamid Etemad, McGill University, Canada                                                                                           |            |
| Yender Lee, National Taipei College of Business                                                                                   |            |

## **SOLVING MULTI-CRITERIA SCHEDULING FLOW SHOP PROBLEM THROUGH THE COMPROMISE PROGRAMMING MODEL**

The multi-criteria scheduling problem is one of the main research subjects in the field of multiple objectives programming. Many authors tried to find solution to this type of problem. The interest in this field can be explained not only by the complexity, but also by the fact that one has to optimize many conflicting criteria. In this paper, we suggest an aggregation procedure that simultaneously integrates many criteria in order to find the best possible sequence in a flow shop production environment. The Compromise Programming Model will be used as an aggregation procedure which offers the manager the possibility to express his preference relative to the deviations between the goals values and the achievement level of objectives such as Makespan, Total flow Time and Total Tardiness.

### **Introduction**

The scheduling theory is concerned with the allocation of a set of limited resources to achieve a certain number of jobs (MacCarty and Liu, 1993). In fact, a scheduling problem consists of finding the sequence of a certain number of jobs to be carried out on different machines, so that technological constraints are satisfied and one or several performance criteria are optimized (T'kindt and Billaut, 2002). It also involves predicting the work to be done, so that we can coordinate timely use of materials and the means of production to be used.

Several approaches and models have been proposed to solve the scheduling problem, namely the discrete variable mathematical programming, simulation techniques and the network analysis. Specific algorithms have solved several simple problems; numerous heuristics have also been utilized. The choice of an appropriate method depends on the complexity of the problem, the number and the configuration of the machines, the production systems, the scheduling system and the static or dynamic nature of job arrivals (Loukil, 2001). Johnson (1954) was the first to propose a method to solve the scheduling problem in a flow shop production environment for mono-criterion context. His findings have served as a reference for other researchers, including, for instance, Palmer (1965), Campbell *et al.* (1970) and Gupta (1970). Other researchers have considered simultaneously more than one criterion. These criteria are generally conflicting. Thus, the optimization of one is done at the expense of the others.

The difficulty of satisfying a set of criteria simultaneously has been at the aim of many publications in this field. We mention, for example the works of Wassenhove *and al.* (1980) Deckro *et al.* (1982), De Prabuddha *et al.* (1992), Morton *et al.* (1993), Gangadhran (1994), Chandrasekhan *et al.* (1996), Tadei *et al.* (1998), Chou *et al.* (1999), and Gupta *et al.* (2001).

Gangadhran (1994) has exploited the Simulated Annealing technique in a heuristic manner that minimizes the makespan and the Total Flow Time (TFT). Kondakci *et al.* (1996) have used the Shortest Processing Time and the Earliest Due Date rules to minimize the TFT and the maximum tardiness penalties.

The above literature review reveals that the proposed methods to solve flow shop scheduling problems do not explicitly take the preference structure of the Manager into account. However, the solutions obtained via these algorithms constitute the efficient frontier. In the set of efficient solutions, the Manager should identify the best solution. Thus, he would be facing another decisional problem, where he should make a compromise between the  $p$  criteria involved in the decisional situation.

In this paper, we suggest a multiple objectives scheduling procedure based on the Compromise Programming Model, in order to determine the best scheduling sequence of  $n$  jobs on  $m$  machines. The best compromise is obtained by the explicit introduction of the Manager's preference structure through the satisfaction functions. This procedure will be illustrated through a numerical example where we will try to find the most satisfying sequence of a set of jobs that are evaluated according to the following criteria (these three criteria are to be minimized): the Makespan, Total Flow Time (TFT), and Total Tardiness (TT).

### Multi-Criteria Scheduling Procedure Based on the Compromise Programming

In this section, we present a procedure to determine the ideal point, *i.e.* the optimal solution on each criterion (individually optimized). At a second stage, the Manager satisfaction functions are introduced in the Compromise Programming Model, based on the ideal point, in order to find the sequence of the best compromise.

#### Finding the Ideal Point

The object of this subsection is to present the way to determine the lower bound on the following scheduling criteria: the Makespan, the TFT and TT.

#### Makespan Criterion

Based on Baker's works (1974), particularly in the case where we have three machines or more, a first mathematical model is presented to determine the sequence minimizing the Makespan criterion (or the maximum fulfilment time of the last job) in order to get its lower bound  $M^*$ . The analytical form of this model is as follows:

Program 1: Minimize  $\sum_{j=1}^n x_{jm}$

Subject to:

$$x_{j+1,k} + \sum_{i=1}^n t_{ik} \xi_{i,j+1} + y_{j+1,k} - y_{j,k} - \sum_{i=1}^n t_{i,k+1} \xi_{ij} - x_{j+1,k+1} = 0; (1 \leq k \leq m-1 \text{ and } 1 \leq j \leq n-1);$$

$$\sum_{i=1}^n \xi_{ij} = 1; \text{ for } 1 \leq j \leq n;$$

$$\sum_{j=1}^n \xi_{ij} = 1; \text{ for } 1 \leq i \leq n;$$

$$x_{1m} - \sum_{i=1}^n t_{i1} \xi_{i1} = 0;$$

$$x_{jm} \geq 0; y_{jk} \geq 0; y_{11} = 0; \text{ and } \xi_{ij} = \{0,1\} \quad \forall i \text{ and } j;$$

where:

$$\xi_{ij} = \begin{cases} 1, & \text{if job } i \text{ was placed in position } j; \\ 0, & \text{Otherwise.} \end{cases} \quad \text{for } i = 1, 2, \dots, n \text{ and } j = 1, 2, \dots, n.$$

- $x_{jk}$ : the idle time of machine  $k$  just before the beginning to process the job having the position  $j$  in the sequence;  
 $y_{jk}$ : the idle time of the job having the position  $j$  in the sequence between its completion on machine  $k$  and its beginning in the machine  $(k+1)$ , for  $k = 1, 2, \dots, m-1$ ;  
 $t_{ik}$ : the processing time of job  $i$  on the machine  $k$ ;  
 $i$ : job index such as  $i = 1, 2, \dots, n$ ;  
 $j$ : position index such as  $j = 1, 2, \dots, n$ .

The objective function of this model aims at minimizing the idle time of the last machine. The makespan equals the sum of the processing time of all jobs in the last machine and its idle time. The first sum is constant no matter what the retained sequence is. So, the minimization of the sum of idle times (Program 1) finds the sequence minimizing the Makespan.

### Total Flow Time Criterion

The analytical form of the model that minimizes the TFT can be summarized as follows:

Program 2: Minimize  $(\sum_{i=1}^j x_{im} + \sum_{i=1}^j \sum_{i=1}^n t_{im} \xi_{it})$

Subject to:

$$x_{j+1,k} + \sum_{i=1}^n t_{ik} \xi_{i,j+1} + y_{j+1,k} - y_{j,k} - \sum_{i=1}^n t_{i,k+1} \xi_{ij} - x_{j+1,k+1} = 0; \quad (1 \leq k \leq m-1 \text{ and } 1 \leq j \leq n-1)$$

$$\sum_{i=1}^n \xi_{ij} = 1; \quad \text{for } 1 \leq j \leq n;$$

$$\sum_{j=1}^n \xi_{ij} = 1; \quad \text{for } 1 \leq i \leq n;$$

$$x_{1m} - \sum_{i=1}^n t_{i1} \xi_{i1} = 0;$$

$$x_{jm} \geq 0; \quad y_{jk} \geq 0; \quad y_{11} = 0; \quad \text{and } \xi_{ij} = \{0, 1\} \quad \forall i \text{ and } j.$$

The objective function of the Program 2 aims at minimizing the sum of idle times in the machine  $m$  and the sum of the job processing times on machine  $m$ .

### Total Tardiness Criterion

The following mathematical model allows obtaining a sequence that minimizes the Total Tardiness.

Program 3: Minimize  $\sum_{l=1}^n \delta_l^+$

Subject to:

$$x_{j+1,k} + \sum_{i=1}^n t_{ik} \xi_{i,j+1} + y_{j+1,k} - y_{j,k} - \sum_{i=1}^n t_{i,k+1} \xi_{ij} - x_{j+1,k+1} = 0; \quad (1 \leq k \leq m-1 \text{ and } 1 \leq j \leq n-1)$$

$$\sum_{i=1}^n \xi_{ij} = 1; \quad \text{for } 1 \leq j \leq n;$$

$$\begin{aligned}
\sum_{j=1}^n \xi_{ij} &= 1; \text{ for } 1 \leq i \leq n; \\
x_{lm} - \sum_{i=1}^n t_{il} \xi_{il} &= 0; \\
\sum_{i=1}^l x_{im} + \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^l t_{ik} \xi_{ij} - d_{il} \xi_{il} - \delta_l^+ - \rho V_{il} &\leq 0; \text{ for } 1 \leq i \leq n \text{ and } 1 \leq l \leq n \\
\sum_{i=1}^n V_{il} &= n-1; \\
V_{il} &= \{0,1\}, \text{ (for } 1 \leq i \leq n \text{ and } 1 \leq l \leq n)
\end{aligned}$$

where:

$l$ : the position of the job in the final sequence;

$\delta_l^+$ : the tardiness of the job having position  $l$  in the sequence (positive deviation with respect to Due Date);

$d_{il}$ : Due Date of job  $i$  having position  $l$ ;

$\rho$ : very large integer number.

It is worth noting that the last set of constraints of this model is subdivided into several constraints (for each position in the sequence we will have  $n$  constraints). Once the three lower bounds (LB) are determined using the above mentioned models, we will therefore have the ideal point  $S^* = (M^*, TFT^*, TT^*)$ . The point  $S^*$  is not attainable because of the conflicting nature of the criteria. Hence, it is necessary to make certain compromises to find a solution that simultaneously takes into account all three criteria.

### Satisfaction Function in the Compromise Programming Model

In this section we will present first the standard formulation of the Compromise Programming Model and secondly we will utilize the concept of the satisfaction functions to formulate a scheduling model where the Manager's preferences are introduced explicitly.

### Compromise Programming Model

The Compromise Programming Model was introduced by Zeleny (1973). The first step in this model consists to establish an ideal point for each objective ( $g^* = (g_1^*, g_1^*, \dots, g_Q^*)$ ), as follows:

$$g_q^* = \text{Max } g_q(x)$$

Subject to:  $x \in F$ ,

where:

$F$ : the feasible solution set,

$g_q(x)$ : the achievement level of the  $q$ th objective.

The aggregation procedure of the Compromise Programming Model consists to minimize the distances between the achievement of each objective and its ideal point as follows:

$$\text{Minimize } L_r(w) = \left[ \sum_{q=1}^Q w_q^r \left| \frac{g_q^* - g_q(x)}{g_q^* - g_{*q}} \right|^r \right]^{1/r}$$

Subject to:  $x \in F$ ,

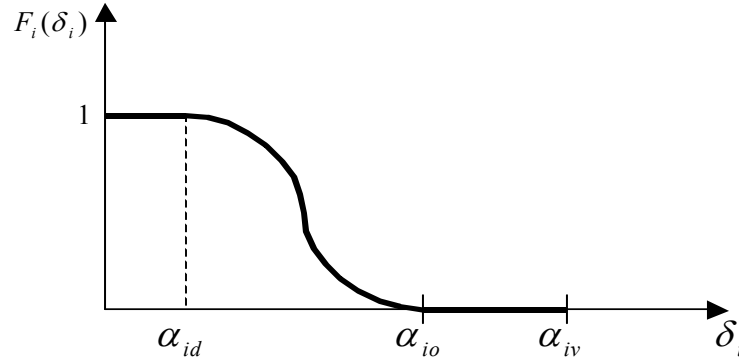
where:

$w_q$ : the relative importance of the objective  $q$ ,

- $g_q^*$  : the ideal point for the  $q$  th objective,
- $g_{*q}$  : the anti-ideal or nadir point for the  $q$  th objective.
- $r$  : represents the parameter defining the family of distance function.

#### b. Introduction of the Manager's Preferences in a Multi-Criteria Scheduling Model

Martel and Aouni (1990) have introduced the concept of satisfaction functions in the Goal Programming Model (GP). Utilizing this model, the Manager can explicitly express his preferences with respect to the deviations from fixed goals for each criterion. The general form of the functions is as follows:



**Figure: 1:** Satisfaction function

where:

$F_i(\delta_i)$  : satisfaction function associated with the deviation  $\delta_i$ ;

$\alpha_{id}$  : represents the *indifference* threshold;

$\alpha_{io}$  : represents the *dissatisfaction* threshold;

$\alpha_{iv}$  : represents the *veto* threshold.

Thus, inside the indifference zone (where  $\delta_i \in [0, \alpha_{id}]$ ), the deviation from the goal is not penalized and the Manager's satisfaction degree reaches its maximum value of 1. As for the deviations in the range  $\delta_i \in [\alpha_{id}, \alpha_{iv}]$ , the Manager's satisfaction function is monotonously decreasing. Finally, any solution leading to a deviation that exceeds the threshold  $\alpha_{iv}$  is rejected. The Manager's preferences would be taken into consideration in the GP model by the integration of these satisfaction functions  $F_i(\delta_i)$ .

Program 4: Maximize  $\sum_{q=1}^Q w_q^+ F_q^+(\delta_q^+)$

Subject to:

$$\begin{aligned} \sum_{j=1}^n x_{jm} + \sum_{j=1}^n \left( \sum_{i=1}^n t_{im} \xi_{ij} \right) - \delta_1^+ &= M^*; \\ \sum_{t=1}^j x_{tm} + \sum_{t=1}^j \left( \sum_{i=1}^n t_{im} \xi_{it} \right) - \delta_2^+ &= TFT^*; \\ \sum_{i=1}^l x_{im} + \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^l t_{ik} \xi_{ij} - d_{il} \xi_{il} - \delta_l^+ - \rho V_{il} &\leq 0; \quad (\text{for } 1 \leq i \leq n \text{ and } 1 \leq l \leq n) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
x_{j+1,k} + \sum_{i=1}^n t_{ik} \xi_{i,j+1} + y_{j+1,k} - y_{j,k} - \sum_{i=1}^n t_{i,k+1} \xi_{ij} - x_{j+1,k+1} &= 0; \text{ (for } 1 \leq k \leq m-1 \text{ and } 1 \leq j \leq n-1) \\
\sum_{i=1}^n \xi_{ij} &= 1; \text{ (for } 1 \leq j \leq n) \text{ and } \sum_{j=1}^n \xi_{ij} = 1; \text{ (for } 1 \leq i \leq n); \\
x_{1m} - \sum_{i=1}^n t_{i1} \xi_{i1} &= 0; \quad x_{jm} \geq 0; \quad y_{jk} \geq 0; \quad y_{11} = 0; \quad \sum_{i=1}^n w_i = 1; \text{ and } \xi_{ij} = \{0,1\} \quad \forall i, j.
\end{aligned}$$

### Numerical Illustration

In order to illustrate the proposed model, we consider the following numerical example. Let there be a scheduling problem of two machines  $M_1$  and  $M_2$  and five jobs (A, B, C, D, E) to be carried out on these two machines in order to minimize the Makespan, TFT and TT simultaneously. The jobs as well as their processing time (in minutes) are presented in table 1.

**Table 1:** Duration of jobs to be processed on  $M_1$  and  $M_2$  machines

| Job | Processing Time on $M_1$ | Processing Time on $M_2$ | Due Date |
|-----|--------------------------|--------------------------|----------|
| A   | 5                        | 6                        | 13       |
| B   | 2                        | 7                        | 10       |
| C   | 4                        | 1                        | 6        |
| D   | 3                        | 2                        | 5        |
| E   | 2                        | 2                        | 4        |

Based on the above data, we will try to find a sequence that minimizes the performance of the three criteria (M, TFT and TT) simultaneously, using the following two steps.

#### Step 1: Finding the Lower Bounds (LB)

We have used two approaches to calculate the Makespan's lower bound:

- Johnson's Algorithm (1954): by applying this algorithm, we have obtained the following two sequences:
  - E-B-A-D-C with a minimum Makespan ( $M^*$ ) of 20 minutes, a 71 minutes TFT and 33 minutes TT,
  - B-E-A-D-C with a minimum Makespan ( $M^*$ ) of 20 minutes, a 76 minutes TFT and 39 minutes TT,
- Program 1: the obtained sequence is E-B-D-A-C with 20 minutes as minimum Makespan ( $M^*$ ), a 67 minutes TFT and 29 minutes TT.

For the second performance criterion (TFT), the lower bound was obtained by using Program 2 presented in the previous section. The sequence that provides a minimum of 62 minutes TFT ( $TFT^*$ ) is E-D-B-C-A.

With reference to the rules used in scheduling and by processing the jobs according to the Earliest Due Date (EDD) rule, we get the processing sequence E-D-C-B-A that offers a 25 minutes TT, a 24 minutes Makespan and 63 minutes TFT. However, if we use the Program 3, we get the sequence E-D-B-C-A that offers a 24 minutes TT, a 22 minutes Makespan and a 62 minutes TFT. Table 3 summarizes the three lower bounds and their corresponding sequences.

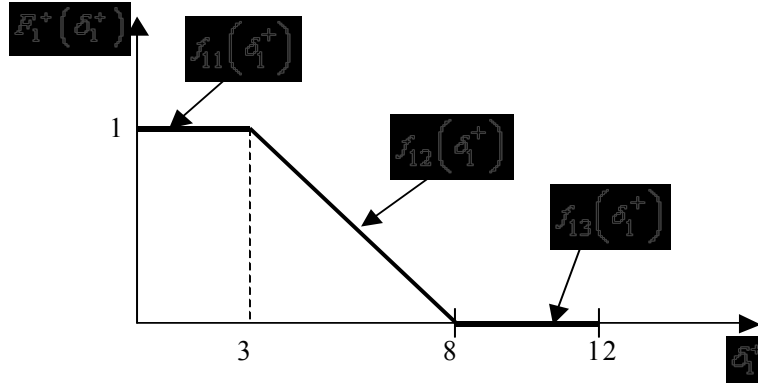
**Table 2:** Finding of step 1

|                        | Makespan<br>(minutes) | TFT<br>(minutes) | TT<br>(minutes) | Sequence  |
|------------------------|-----------------------|------------------|-----------------|-----------|
| Johnson's<br>algorithm | 20 (LB)               | 71               | 33              | E-B-A-D-C |
|                        | 20 (LB)               | 76               | 39              | B-E-A-D-C |
| EDD                    | 24                    | 63               | 25              | E-D-C-B-A |
| Program 1              | 20 (LB)               | 67               | 29              | E-B-D-A-C |
| Program 2              | 22                    | 62 (LB)          | 24 (LB)         | E-D-B-C-A |
| Program 3              | 22                    | 62 (LB)          | 24 (LB)         | E-D-B-C-A |

The ideal sequence that simultaneously optimizes the performance of the three criteria is the one that gives the three following values  $M^*=20$  minutes,  $TFT^*=62$  minutes and  $TT^*=24$  minutes. Given the fact that the ideal is not attainable due to the fact that the criteria are conflicting, the application of the Compromise Programming Model that takes into account the Manager preferences produces a compromise sequence. This will be achieved in the following step.

### Step 2: Application of the Compromise Programming Model Taking into Account the Manager's Satisfaction Functions

In this step, the Manager provides satisfaction functions, one for each criterion of Makespan, TFT, and fine for TT. For the latter, the Manager expresses his preferences towards each job. To illustrate this, the satisfaction function for the first job in the final sequence is presented as follows:

**Figure 2:** The retained satisfaction function for the TT criterion (first job)

Starting from the fact that the Manager seeks a sequence that minimizes the TT, we have considered the same satisfaction function for all jobs. According to Figure 2, the Manager is totally satisfied when the deviation, from the ideal (no tardiness), ranges between 0 and 3. His satisfaction is decreasing for the deviations in the interval  $\delta_1^+ \in ]3, 8]$ . However, the Manager is dissatisfied for each tardiness between 8 and 12 minutes. Furthermore, any sequence generating any tardiness that is more than 12 minutes (*i.e.*  $\delta_1^+ > 12$ ) will be rejected by the Manager. Only the positive deviations are to be minimized because we have considered, as a hypothesis, that any job, which is completed earlier than due time, would be accepted. This satisfaction function  $F_1^+(\delta_1^+)$  can be decomposed as follows:

$$F_1^+(\delta_1^+) = \begin{cases} f_{11}(\delta_1^+) = 1, & \text{if } 0 \leq \delta_1^+ \leq 3; \\ f_{12}(\delta_1^+) = 1.6 - 0.2\delta_1^+, & \text{if } 3 < \delta_1^+ \leq 8; \\ f_{13}(\delta_1^+) = 0, & \text{if } 8 < \delta_1^+ \leq 12. \end{cases}$$

The equivalent representation of this function requires the introduction of three binary variables  $\beta_{11}$ ,  $\beta_{12}$  and  $\beta_{13}$ . These binary variables were defined as follows:

$$\beta_{11} = \begin{cases} 1, & \text{if } 0 \leq \delta_1^+ \leq 3; \\ 0, & \text{Otherwise.} \end{cases}, \beta_{12} = \begin{cases} 1, & \text{if } 3 < \delta_1^+ \leq 8; \\ 0, & \text{Otherwise.} \end{cases}, \text{ and } \beta_{13} = \begin{cases} 1, & \text{if } 8 < \delta_1^+ \leq 12; \\ 0, & \text{Otherwise.} \end{cases}$$

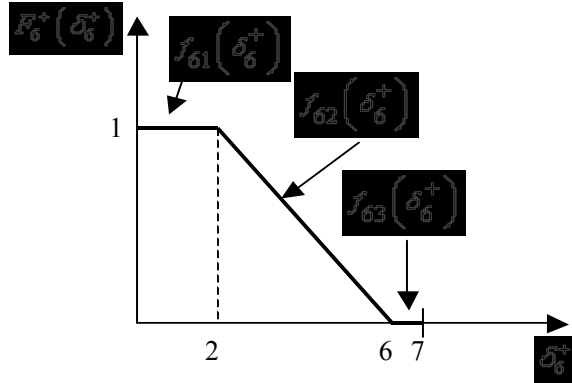
Thus, the function may take the following equivalent form:

$$\begin{aligned} F_1^+(\delta_1^+) &= \beta_{11}f_{11}(\delta_1^+) + \beta_{12}f_{12}(\delta_1^+) + \beta_{13}f_{13}(\delta_1^+); \\ &= \beta_{11}(1) + \beta_{12}(1.6 - 0.2\delta_1^+) + \beta_{13}(0); \\ &= \beta_{11} + 1.6\beta_{12} - 0.2\beta_{12}\delta_1^+; \end{aligned}$$

under the following constraints:

$$\begin{aligned} \beta_{11} + \beta_{12} + \beta_{13} &= 1, \\ 3\beta_{12} + 8\beta_{13} - \delta_1^+ &\leq 0, \\ \delta_1^+ - 3\beta_{11} - 8\beta_{12} - 12\beta_{13} &\leq 0, \\ \beta_{11} &= \{0, 1\}, \beta_{12} = \{0, 1\} \text{ and } \beta_{13} = \{0, 1\}. \end{aligned}$$

The expression  $0.2\beta_{12}\delta_1^+$  of the new representation of  $F_1^+(\delta_1^+)$  is non linear. The optimization of this type of function requires the linearization of this term. The above procedure is performed for all jobs, so we will have  $F_2^+(\delta_2^+)$ ,  $F_3^+(\delta_3^+)$ ,  $F_4^+(\delta_4^+)$  and  $F_5^+(\delta_5^+)$ . For the Makespan criterion, we have retained the following satisfaction function (Figure 3):



**Figure 3:** The retained Makespan satisfaction function

According to this function, the Manager is totally satisfied when the deviations from the ideal Makespan, ranges between  $[0, 2]$  ( $\delta_6^+ \in [0, 2]$ ). His satisfaction would be decreasing when the deviation is in the following interval:  $\delta_6^+ \in [2, 6]$ . And, the Manager would be dissatisfied with any sequence resulting in a deviation within  $]6, 7]$  ( $\delta_6^+ \in ]6, 7]$ ) interval. Moreover, any sequence that has a Makespan more than 27 minutes (that is to say,  $\delta_6^+ > 7$ ) would be rejected by the Manager. The satisfaction function  $F_6^+(\delta_6^+)$  can be decomposed as follows :

$$F_6^+(\delta_6^+) = \begin{cases} f_{61}(\delta_6^+) = 1, & \text{if } 0 \leq \delta_6^+ \leq 2; \\ f_{62}(\delta_6^+) = 1.5 - 0.25\delta_6^+, & \text{if } 2 < \delta_6^+ \leq 6; \\ f_{63}(\delta_6^+) = 0, & \text{if } 6 < \delta_6^+ \leq 7. \end{cases}$$

The equivalent form of this function requires the introduction of the following three binary variables:

$$\beta_{61} = \begin{cases} 1, & \text{if } 0 \leq \delta_2^+ \leq 2; \\ 0, & \text{otherwise.} \end{cases}; \beta_{62} = \begin{cases} 1, & \text{if } 2 < \delta_2^+ \leq 6; \\ 0, & \text{otherwise.} \end{cases} \text{ and } \beta_{63} = \begin{cases} 1, & \text{if } 6 < \delta_2^+ \leq 7; \\ 0, & \text{otherwise.} \end{cases}$$

Thus, the function takes the following equivalent form:

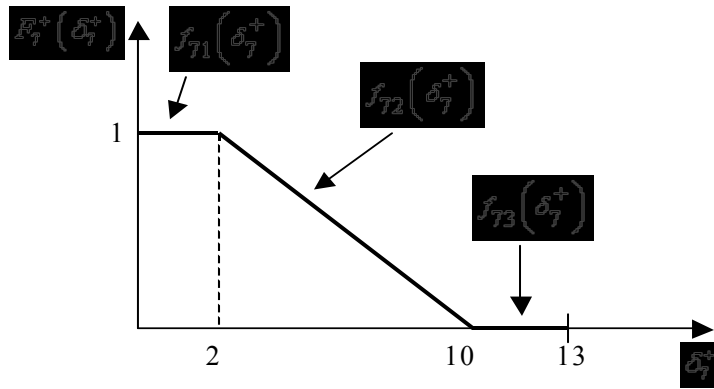
$$\begin{aligned} F_6^+(\delta_6^+) &= \beta_{61}f_{61}(\delta_6^+) + \beta_{62}f_{62}(\delta_6^+) + \beta_{63}f_{63}(\delta_6^+), \\ &= \beta_{61}(1) + \beta_{62}(1.5 - 0.25\delta_6^+) + \beta_{63}(0), \\ &= \beta_{61} + 1.5\beta_{62} - 0.25\beta_{62}\delta_6^+, \end{aligned}$$

under the following constraints:

$$\begin{aligned} \beta_{61} + \beta_{62} + \beta_{63} &= 1, \\ 2\beta_{62} + 7\beta_{63} - \delta_6^+ &\leq 0, \\ \delta_6^+ - 2\beta_{61} - 5\beta_{62} - 7\beta_{63} &\leq 0, \\ \beta_{61} &= \{0, 1\}, \beta_{62} = \{0, 1\} \text{ and } \beta_{63} = \{0, 1\}. \end{aligned}$$

The expression  $0.25\beta_{62}\delta_6^+$  of the new representation of  $F_6^+(\delta_6^+)$  is non linear. The optimization of this type of function requires the linearization of this expression.

As for the TFT criterion, we have retained the following satisfaction function (Fig. 4):



**Figure 4:** The retained TFT satisfaction function

According to this function, the Manager is totally satisfied when the deviation from the ideal TFT is between  $[0, 2]$  ( $\delta_7^+ \in [0, 2]$ ). His satisfaction would be decreasing for all deviations belonging to the following interval:  $\delta_7^+ \in ]2, 10]$ . And, the Manager would be dissatisfied with any for each sequence leading to a deviation which ranges between  $]10, 13]$  ( $\delta_7^+ \in ]10; 13]$ ). Furthermore, the manager would reject all sequences having a TFT that exceeds 75 minutes (that is to say  $\delta_7^+ > 13$ ). The satisfaction function  $F_7^+(\delta_7^+)$  can be decomposed in the following way:

$$F_7^+(\delta_7^+) = \begin{cases} f_{71}(\delta_7^+) = 1, & \text{if } 0 \leq \delta_7^+ \leq 2; \\ f_{72}(\delta_7^+) = 1.25 - 0.125\delta_7^+, & \text{if } 2 < \delta_7^+ \leq 10; \\ f_{73}(\delta_7^+) = 0, & \text{if } 10 < \delta_7^+ \leq 13. \end{cases}$$

The equivalent form of this function requires the introduction of three binary variables  $\beta_{71}$ ,  $\beta_{72}$  and  $\beta_{73}$  which are defined as follows:

$$\beta_{71} = \begin{cases} 1, & \text{if } 0 \leq \delta_2^+ \leq 2; \\ 0, & \text{otherwise.} \end{cases}, \beta_{72} = \begin{cases} 1, & \text{if } 2 < \delta_2^+ \leq 10; \\ 0, & \text{otherwise.} \end{cases} \text{ and } \beta_{63} = \begin{cases} 1, & \text{if } 10 < \delta_2^+ \leq 13; \\ 0, & \text{otherwise.} \end{cases}$$

Accordingly, the function can have the following equivalent form:

$$\begin{aligned} F_7^+(\delta_7^+) &= \beta_{71}f_{71}(\delta_7^+) + \beta_{72}f_{72}(\delta_7^+) + \beta_{73}f_{73}(\delta_7^+) \\ &= \beta_{71}(1) + \beta_{72}(1.25 - 0.125\delta_7^+) + \beta_{73}(0) = \beta_{71} + 1.25\beta_{72} - 0.125\beta_{72}\delta_7^+ \end{aligned}$$

under the following constraints:

$$\begin{aligned} \beta_{71} + \beta_{72} + \beta_{73} &= 1, \\ 2\beta_{72} + 10\beta_{73} - \delta_7^+ &\leq 0, \\ \delta_7^+ - 2\beta_{71} - 10\beta_{72} - 13\beta_{73} &\leq 0, \\ \beta_{71} &= \{0;1\}, \beta_{72} = \{0;1\} \text{ and } \beta_{73} = \{0;1\}. \end{aligned}$$

The expression  $0.125\beta_{72}\delta_7^+$  of the new representation of  $F_7^+(\delta_7^+)$  is non linear. The optimization of this type of function requires the linearization of this expression. The Manager seeks to maximize his satisfaction level. Thus, the satisfaction functions  $F_1^+(\delta_1^+)$ ,  $F_2^+(\delta_2^+)$ , ...,  $F_7^+(\delta_7^+)$  have to be maximised. These functions contain non-linear expressions. To get an equivalent linear formula, we resort to the linearization procedure developed by Oral and Kettani (1992) and modified by Aouni (1996, 1998). After inserting the Manager's satisfaction functions, we have assigned weights ( $W_1$ ,  $W_2$  and  $W_3$ ) to the three criteria. These weights reflect the importance given by the Manager to each of the three criteria. We consider that the three weights are normalized, in other words, their sum equals 1 (*i.e.*,  $0 \leq W_1 \leq 1$ ,  $0 \leq W_2 \leq 1$ ,  $0 \leq W_3 \leq 1$  and  $W_1 + W_2 + W_3 = 1$ ). It is worth mentioning that the importance given to the TT criterion is divided by the number of jobs (we have five jobs), *i.e.*,  $W_3 = W_{31} + W_{32} + W_{33} + W_{34} + W_{35}$ . As a result, the resolution of mathematical problem 4, allows us to generate a compromise solution which takes into account the three criteria. The Table 3 provides the solutions obtained for different weights assigned to the three criteria.

**Table 3:** Sequences obtained with different weights

| Iteration | $W_1$ | $W_2$ | $W_3$ | Sequence  | Makespan | TFT  | TT   |
|-----------|-------|-------|-------|-----------|----------|------|------|
| 1         | 0.1   | 0.8   | 0.1   | E-D-B-C-A | 22       | 62   | 24   |
| 2         | 0.8   | 0.1   | 0.1   | Idem      | Idem     | Idem | Idem |
| 3         | 0.7   | 0.2   | 0.1   | D-E-B-C-A | 22       | 63   | 25   |
| 4         | 0.6   | 0.3   | 0.1   | E-D-B-C-A | 22       | 62   | 24   |
| 5         | 0.4   | 0.5   | 0.1   | D-E-B-C-A | 22       | 63   | 25   |
| 6         | 0.2   | 0.7   | 0.1   | Idem      | Idem     | Idem | Idem |
| 7         | 0.1   | 0.8   | 0.1   | Idem      | Idem     | Idem | Idem |
| 8         | 0.0   | 0.9   | 0.1   | E-D-B-C-A | 22       | 62   | 24   |
| 9         | 0.9   | 0.0   | 0.1   | Idem      | Idem     | Idem | Idem |
| 10        | 0.1   | 0.1   | 0.8   | Idem      | Idem     | Idem | Idem |
| 11        | 1/3   | 1/3   | 1/3   | D-E-B-C-A | 22       | 63   | 25   |

Observing the results presented in table 3, we notice that if the Manager considers the three criteria as equally important, the resulting sequence provides a 22 minutes Makespan, a 63 minutes TFT and a 25 minutes TT. This solution is considered to be a compromise solution. In case the Manager gives more importance to the first criterion in comparison with other's, for instance,  $W_1=0.8$ ;  $W_2=0.1$  and  $W_3=0.1$ , the solution obtained has a 22 minutes Makespan, a 62

minutes TFT and a 24 minutes TT. This means that the Manager is highly satisfied with the three criteria since the results are always within the indifference threshold.

Through applying different weights, we can observe the impact of weights on the obtained sequences by the Compromise Programming Model.

As we have previously mentioned, the ideal sequence  $S^*$  would be the one which supplies a 20 minutes Makespan, a 62 minutes TFT and a 24 minutes TT. Each presented sequence reflects some degree of satisfaction by the Manager for relative importance assigned to the criteria. It is worth noting that any modification of the threshold of the Manager's satisfaction function may bring about changes in the sequence. Thus, the value of the solution obtained is satisfying whatever weight assigned to the three criteria.

## Conclusion

The scheduling procedure that has been developed in this paper, allows the Manager to integrate his preferences for each criterion in order to solve a multi-criteria scheduling problem. This procedure, based on Compromise Programming Model, is flexible and is able to enrich the process of obtaining the most satisfying sequence, the one that offers the best compromise. Additionally, this procedure can solve problems with more than three criteria. It also guarantees that the obtained sequence would not be dominated. While experimenting with this procedure, we noticed that the number of constraints for an example of only five jobs is very significant. Thus, we are convinced that there is a need to resort to metaheuristics in order to improve the speed of solving any problem with larger number of jobs in terms of CPU time.

## References

- Aouni, B., «Linéarisation des expressions quadratiques en programmation mathématique : des bornes plus efficaces», *Administrative Sciences Association of Canada, Management Science*, Vol. 17, No. 2, 1996 (38-46).
- Aouni, B., «Le modèle de programmation mathématique avec buts dans un environnement imprécis: sa formulation, sa résolution et une application», *thèse de doctorat non publiée*, Faculté des sciences de l'administration, Université Laval, 1998.
- Baker, K.R., *«Introduction to Sequencing and Scheduling»*, John Wiley, New York, 1974.
- Chandrasekharan, R., «Theory and Methodology Heuristics for Scheduling in Flow Shop with Multiple Objectives», *European Journal of Operational Research*, Vol.82, 1995 (540-555).
- Chou, F.-D. and C.-E. Lee, «Two-Machine Flow-Shop Scheduling with Bicriteria Problem», *Computers and Industrial Engineering*, Vol.36, 1999 (549-564).
- De Prabuddha, Ghosh Jay, and Wells Charles, «Heuristic Estimation of the Efficient Frontier for a Bicriteria Scheduling Problem», *Decision Sciences*, Vol.23, 1992 (596-608).
- Deckro, R.F., J.E. Hebert and E.P. Winkofsky, «Multiple Criteria Job-Shop Scheduling», *Computers and Operational Research*, Vol.9, 1982 (279-285).
- Gangadhran, R., «A Simulated Annealing Heuristic for Scheduling in a Flow Shop with Bicriteria», *Computers and Industrial Engineering*, 1994 (473-476).

Gupta, J.N.D., V.R. Neppall, and F. Werner, « Minimizing Total Flow Time in a Two-Machine Flow-Shop Problem with Minimum Makespan», *International Journal Of Production Economics*, Vol. 69, 2001 (323-338).

Johnson, S., «Optimal Two and Three Stage Production Schedules with Set-Up Time Included», *Naval Research Logistics Quarterly*, Vol. 1, 1954 (61-68).

MacCarthy, B.L. and Jiyin Liu, «Addressing the Gap in Scheduling Research: A Review of Optimization and Heuristic Methods in Production Scheduling», *International Journal of Production Research*, Vol.31, N°.1, 1993 (59-79).

Martel, J.-M. and B. Aouni, «Incorporating the Decision-Maker's Preferences in the Goal Programming Model», *Journal of Operational Research Society*, Vol. 41, 1990 (1121-1132).

Loukil, T., « L'ordonnancement multicritère de la production: fondements, nouvelles approches de résolution et applications», *thèse de doctorat d'état non publiée*, Université de Sfax, Avril 2001.

Morton, T. and D. Pentico, «Heuristic Scheduling Systems», *Wiley Series in engineering and Technology Management* 1993 (318).

Oral, M. and O. Kettani, «A Linearization Procedure for Quadratic and Cubic Mixed-Integer Problems», *Operations Research*, Vol. 40, Supp. No. 1, 1992 (S109-S116).

Kondakci S. K., M. Azizoglu and M. Köksalan, «Bicriteria Scheduling for Minimizing Flow Time and Maximum Tardiness», *Naval Research Logistics*, Vol. 43, 1996 (929-936).

Tadei, R., J.N.D. Gupta, F.D. Croce and M. Cortesi, «Minimising Makespan in the Two-Machine Flow-Shop with Release Times», *Journal of the Operational Research Society*, Vol.49, 1998 (77-85).

T'kindt, V. and J.-C. Billaut, «Multicriteria Scheduling Theory, Models and Algorithms», *Springer Verlag*, 2002.

Wassenhove V., N. Luc . and L. F. Gelders, «Solving a Bicriterion Scheduling Problem», *European Journal of Operational Research*, Vol. 4, 1980 (42-48).

Zeleny, M., «Compromise Programming», In *Multiple Criteria Decision Making*, Cochrane, J. L. and M. Zeleny (Eds.), University of South Carolina Press, Columbia, 1973 (262-301).

## **OPTIMISATION DU TRANSPORT DE CHARGES PARTIELLES: UNE APPLICATION PRATIQUE**

Dans un monde où les marchandises doivent circuler rapidement, les entreprises de transport doivent gérer beaucoup de charges partielles. Ceci complique la tâche des planificateurs qui doivent faire un travail de répartition efficace afin de rentabiliser les tournées. Cet article présente une procédure dans laquelle les outils bureautiques actuels sont utilisés conjointement avec des heuristiques afin de produire des solutions près de l'optimum.

### **Avant-propos**

Pour une entreprise de transport de charges partielles (LTL) canadienne possédant un réseau de terminus d'est en ouest, livrer des expéditions LTL à la grandeur des États-Unis, sans terminal, représente tout un défi d'adaptation pour son personnel d'opérations. En raison des distances importantes à parcourir et des livraisons dans toutes les directions, il est essentiel de doter les répartiteurs d'outils informatiques leur permettant de mieux planifier les tournées pour minimiser les coûts. C'est dans ce contexte que nous avons appuyé le projet de Marie-Claude Bolduc et lui avons fourni les informations nécessaires pour le réussir.

– Jean Guilbault, président, Groupe Guilbault Ltée

### **Introduction**

Dans un contexte de juste-à-temps où les marchandises doivent être présentes au bon endroit, au bon moment et en bonne quantité, les entreprises se doivent de transporter leurs produits le plus efficacement possible et ceci à moindres coûts. Suivant ces conditions, les charges partielles (LTL—less-than-truckload), c'est-à-dire les envois de marchandises ne nécessitant pas l'espace d'un plein camion, sont nombreuses. Pour les compagnies de transport, ce type de demande nécessite un traitement particulier. En effet, afin d'être en mesure de rentabiliser ses opérations, le transporteur doit faire une répartition des marchandises pour que chacun de ses camions soit rempli le plus possible, ceci tout en tendant à minimiser la distance totale des tournées.

Plusieurs outils de répartition sont disponibles sur le marché. L'entreprise GEOCOMtms a développé l'application A.MAZE. Ce logiciel permet d'optimiser les problèmes de routage à grande échelle grâce à l'intégration de services disponibles sur Internet. A.MAZE est utilisé par diverses entreprises dont Ameublements Tanguay, Alex Coulombe et Purolator. Cette dernière, selon un article publié dans la revue *Gestion logistique* en avril 2002, a spécifié qu'elle avait choisi cette application à la suite de plusieurs tests. Purolator a également mentionné que le logiciel lui a permis d'obtenir des améliorations considérables.

Une entreprise concurrente, Maddocks Systems Inc., a développé Truckmate pour Windows (Tm4win). L'application permet de minimiser la distance parcourue tout en gérant le transbordement lié aux charges partielles. Afin d'être compétitif, une association a été conclue en 2002 avec GEOCOMtms. Une telle entente permet désormais de lier les deux applications, ce qui offre aux utilisateurs une solution rendant possible une meilleure gestion de leur flotte.

Un autre compétiteur, le Groupe Millobit, a également conçu son logiciel : Millogiciel. En 2002, une entente est intervenue avec Cancom Tracking, qui se spécialise en communication par satellite. L'intégration Cancom-Millogiciel a permis de créer une application alliant à la fois le repérage et la gestion intelligente des flottes. Autrefois, un lien entre le Groupe Millobit et Cancom Tracking (OMNI-TRACS) se formait uniquement pour la création d'applications sur mesure, ce qui impliquait des coûts très élevés. Grâce à cette alliance, le nouveau logiciel offert est un peu plus accessible. Cancom Tracking a également comme partenaire Maddocks Systems Inc. et compte parmi ses clients, entre autres, Magna Transportation et Quick X Transport, tous deux oeuvrant dans le transport de charges partielles.

Toutes ces applications, qui permettent aux répartiteurs de mieux planifier leurs opérations, sont efficaces mais dispendieuses. En effet, de telles implantations nécessitent des investissements de l'ordre de plusieurs dizaines de milliers de dollars. Dans certains cas, elles peuvent même atteindre les 100 000 \$. Malheureusement, les petites et moyennes entreprises dans le domaine du transport routier n'ont pas les moyens de s'offrir de tels logiciels. Actuellement, sur le marché, il n'existe pas de solutions abordables pouvant leur être accessibles. Pourtant, l'informatique fait désormais partie du quotidien des gens. Aucune entreprise ne penserait faire des affaires sans avoir en sa possession au moins un ordinateur. Il est désormais possible, grâce à divers outils bureautiques tels que Microsoft Excel, PC\*Miler de Alk Technologies, Microsoft MapPoint, Microsoft Visual Basic et Ilog Cplex, de construire des applications de répartition efficaces pouvant combler ce vide. Dans cet article, nous montrons de quelle façon ces outils peuvent être intégrés afin de fournir une solution de planification sur mesure aux petites et moyennes entreprises de transport.

### **Intégration des outils bureautiques**

Les divers outils bureautiques précédemment mentionnés sont à la fois abordables et conviviaux. Ainsi, ils sont accessibles à tous, contrairement aux logiciels de répartition décrits auparavant qui nécessitent de grands investissements en plus des nombreuses heures d'intégration, d'ajustement et de formation avant de répondre aux besoins du transporteur. Cette simplicité d'utilisation, couplée à un développement sur mesure, permettra aux petits transporteurs de bénéficier d'un avantage concurrentiel aussi important que celui des grandes entreprises, ceci en échange d'investissements mineurs. Dans les pages qui suivent, il sera démontré comment une application sur mesure peut être développée à l'aide de logiciels commerciaux reconnus et peu dispendieux. Évidemment, le choix des logiciels peut varier, mais ceux sélectionnés ont été choisis en fonction de leur reconnaissance sur le marché et de leur facilité d'intégration.

Dans un premier temps, le logiciel Microsoft Excel permet aux utilisateurs de profiter des avantages d'un tableur. Il facilite l'entrée des données en plus de bénéficier des fonctions de calculs et de macro-commandes simples. Plusieurs entreprises adoptent Microsoft Excel pour sa simplicité par rapport à d'autres interfaces de saisie de données.

Puisque la répartition est directement liée à la géographie, il est important d'intégrer un logiciel de cartographie numérique. PC\*Miler de Alk Technologies est une application pouvant répondre à ce besoin. Il est d'ailleurs devenu un logiciel courant dans l'industrie du transport. Cette application est idéale dans le cas où le transporteur fait sa distribution dans diverses villes.

En effet, ce logiciel ne renferme pas toutes les informations sur les routes secondaires, il utilise donc une fonction afin d'approximer certaines distances. Pour une entreprise de transport qui nécessiterait une telle précision, il sera préférable d'opter pour le logiciel Microsoft MapPoint. Cette application, beaucoup plus détaillée, permet de calculer les distances de façon très précise en tenant compte de contraintes réelles.

Afin d'intégrer l'utilisation de Microsoft Excel et de PC\*Miler ou de Microsoft MapPoint, un logiciel de programmation évolué, comme Microsoft Visual Basic, est nécessaire. Une telle application, en plus d'offrir une souplesse de calculs, permet de générer des interfaces faciles d'utilisation.

Finalement, un logiciel d'optimisation, comme Ilog Cplex, permet de valider les résultats obtenus. Grâce à cette application et au modèle mathématique représentant le problème à solutionner (Kohl et Madsen, 1997), il est possible d'obtenir la solution optimale. Notons cependant que les temps de résolution peuvent être très élevés, ceci étant dû à la complexité du problème d'origine dont le modèle d'optimisation en est un Np-dur. Dans cet article, ce modèle ne sera utilisé que dans un but théorique, c'est-à-dire pour valider la qualité des solutions obtenues. Par contre, il pourrait aisément être intégré à l'application de façon générale, ceci impliquant que les entreprises de transport devraient acquérir un logiciel supplémentaire (Bolduc, 2003).

## Problématique

La répartition et le transport des marchandises en charges partielles correspondent à un problème de tournées de véhicules. Ces problèmes ont retenu une attention considérable de la part des chercheurs au cours des vingt dernières années; l'immensité des travaux scientifiques réalisés suffit à nous en convaincre. De nombreuses revues de la littérature ont été effectuées, mentionnons entre autres celles de Bodin *et al.* (1983) et de Laporte (1992a, 1992b, 1993). Notons également le livre de Lawler *et al.* (1983) sur le problème du voyageur de commerce (près de 600 références) et de Golden et Assad (1988) sur les problèmes de tournées de véhicules. En plus de ces travaux, Laporte et Osman (1995) ont effectué une bibliographie récente qui compte 500 références. Malgré toutes ces recherches, le problème de tournées de véhicules demeure un problème combinatoire extrêmement difficile à solutionner. À ce jour, aucun algorithme exact n'arrive à résoudre de façon constante des problèmes ayant plus de 50 clients (Toth et Vigo, 1998). Une attention considérable est donc toujours vouée au développement d'heuristiques performantes. À cet effet, Cordeau *et al.* (2001) présentent un guide dédié à l'implantation des heuristiques pour les problèmes de tournées de véhicules.

La situation que nous traitons est une variante du problème traditionnel de tournées de véhicules. Nous avons un ensemble de clients qui demandent des expéditions de marchandises. Chaque expédition est caractérisée par un poids, par un nombre de palettes et par un revenu qui lui est associé. Pour répondre à cette demande, l'entreprise dispose d'une flotte de taille variable. La capacité des véhicules est limitée par le poids total et par le nombre de palettes pouvant être transportées. Il n'y a aucune contrainte reliée au type d'équipement pour manipuler la marchandise puisqu'il s'agit de chargements de palettes standards. De plus, les heures de conduites ne posent aucune contrainte car en pratique la tarification basée sur la distance en tient compte implicitement. Les conducteurs prennent alors simplement des périodes de repos lorsqu'ils atteignent le nombre d'heures maximales de conduite imposées par la loi. Par ailleurs, comme il s'agit de transport longue distance, aucune fenêtre de temps n'est imposée sur les heures de livraisons (contrairement au transport local). Finalement, ce problème possède une caractéristique supplémentaire particulière : à chaque client est également associé un revenu de retour potentiel. Pour que ce revenu de retour soit perçu, le client doit être visité en dernier sur sa route (puisque ce revenu de retour correspond à un plein camion – *backhaul*). Si un véhicule termine sa route chez un client où aucun revenu de retour n'est disponible, il revient simplement à

vide. L'objectif du répartiteur est donc de déterminer le nombre optimal de véhicules, de leur assigner un ensemble de clients respectant les contraintes de chargement tout en maximisant la contribution de l'opération. La contribution doit être perçue comme étant le profit (revenus des charges partielles + revenu des charges de retour – coûts de transport) de l'opération, mais nous ne pouvons parler d'un profit net pour l'entreprise, puisque cette valeur ne tient pas compte de ses autres coûts, tel que les coûts d'administration. Pour cette raison, le terme contribution sera conservé.

### Méthode de résolution

La méthode de résolution développée fonctionne de façon itérative. À chaque itération, un ensemble de routes est construit en utilisant un algorithme paramétré. Chaque route est alors améliorée individuellement. Une procédure d'échanges est appliquée afin de voir s'il serait profitable de permuter les clients entre les routes. Toutes ces étapes sont répétées onze fois avec différents paramètres dans le but de générer de meilleures solutions. À la fin, la meilleure solution est utilisée pour imprimer les feuilles de route des conducteurs. La Figure 1 présente l'organigramme de la méthode développée et le détail des étapes est présenté ci-dessous. La notation suivante est utilisée :

- $Z$  : Valeur de la solution courante,
- $S$  : Ensemble des routes de la solution courante,
- $Z^*$  : Valeur de la meilleure solution trouvée,
- $S^*$  : Ensemble des routes de la meilleure solution trouvée,
- $\alpha$  : Paramètre d'ajustement pour la formation des routes.

#### Étape 1 : Initialisation

Entrée des données sur les expéditions et sur les revenus de retour. Génération de la matrice des distances  $C$  à l'aide de PC\*Miler. Initialisation des données suivantes :  $Z^* = \infty$ ,  $S^* = \emptyset$ ,  $\alpha = 0,5$ .

#### Étape 2 : Formation des routes

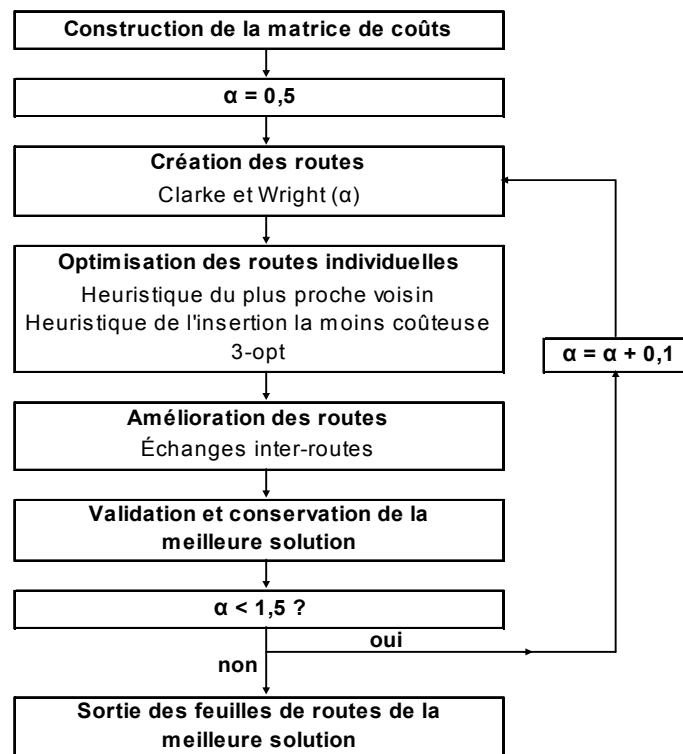
Résolution du problème de tournées à l'aide d'une adaptation de l'algorithme de Clarke et Wright (1964) où le calcul des économies se fait comme suit :  $s_{ij} = c_{0i} + c_{j0} - \alpha c_{ij}$  où  $c_{0i}$  est la distance entre le dépôt et le client  $i$  et  $\alpha$  un facteur d'ajustement (Yellow, 1970). L'algorithme original a dû être adapté pour tenir compte des contraintes sur le poids des expéditions, sur le nombre de palettes ainsi que pour inclure les revenus associés à la dernière ville visitée lors de chaque tournée. Pour tenir compte du revenu associé à la dernière ville, à chaque phase, chaque tournée générée a été évaluée dans les deux sens et la meilleure est retenue à chaque évaluation. À cette étape, nous avons une solution  $S$  de valeur  $Z$ .

#### Étape 3 : Amélioration individuelle des routes

Puisqu'il est possible que les routes générées par l'algorithme de Clarke et Wright ne soient pas individuellement optimales, chaque route est améliorée une à une. Pour ce faire, l'application développée utilise trois heuristiques reconnues pour le problème du voyageur de commerce. Tous ces algorithmes ont été modifiés, afin de tenir compte des revenus de retour. Dans un premier temps, chaque route est résolue à l'aide des heuristiques du plus proche voisin et de l'insertion la moins coûteuse (Rosenkrantz, Stearns et Lewis, 1977). L'algorithme d'amélioration 3-opt (Lin, 1965) est alors appliqué à chacune des routes. Les routes sont mises à jour, ainsi que  $S$  et la valeur de la solution  $Z$ .

Figure 1

### Algorithme de résolution de l'application développée



#### Étape 4 : Amélioration des routes

Cette étape cherche à améliorer les routes en échangeant les clients entre les routes. Chaque client est donc considéré, un à un, pour être inséré dans chacune des autres routes, à toutes les localisations possibles (toujours en considérant les coûts de retour). De plus, chaque paire de clients est également étudiée, les positions respectives des clients étant échangées. Cette procédure correspond à la procédure d'échange- $\lambda$  ( $\lambda$ -interchange) proposée par Osman (1993) avec  $\lambda = 1$ . Chaque amélioration est conservée et les valeurs de  $Z$  et  $S$  sont mises à jour.

#### Étape 5 : Validation et contrôle des itérations

Si  $Z < Z^*$ , une meilleure solution a été trouvée, mettre  $Z^* = Z$  et  $S^* = S$ . Si  $\alpha < 1,5$  alors  $\alpha = \alpha + 1$  et retour à l'étape 2. Si  $\alpha = 1,5$  l'algorithme est terminé; la meilleure solution trouvée est  $S^*$  et sa valeur est  $Z^*$ . Imprimer les feuilles de routes des conducteurs dans Microsoft Excel.

Bien sur, chacun des algorithmes proposés ci-dessus pourrait être remplacé par des procédures plus performantes. À cet effet, Cordeau *et al.* (2001) ont étudié les avantages et les inconvénients des meilleurs algorithmes pour le problème de tournées de véhicules.

## Étude de cas

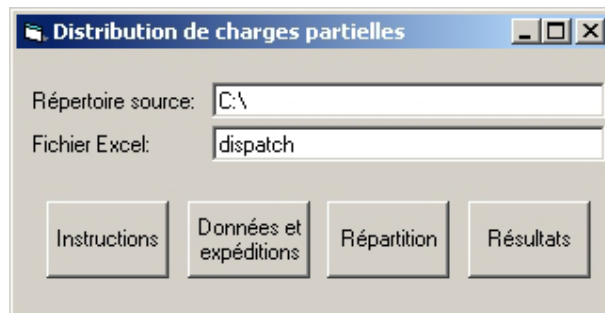
Afin de se conformer à la réalité de l'industrie du transport, la précieuse collaboration d'une entreprise de la région de Québec nous a permis d'obtenir des données réelles. L'application développée tient compte, en plus de la distance à parcourir, des caractéristiques des expéditions et des camions (en poids et en palettes) et des revenus de retour potentiels. Un seul revenu de retour par camion est permis, puisqu'il sera constitué d'une charge pleine trouvée sur le marché de la dernière ville visitée. En conséquence, pour chacune des expéditions, des décisions sur le choix du véhicule et sur l'ordre de chargement sont prises.

Concrètement, l'application développée utilise les outils bureautiques décrits précédemment. D'abord, l'utilisateur devra définir dans une interface Microsoft Visual Basic (Figure 2) le répertoire où est enregistré le fichier Microsoft Excel renfermant les données de répartition, ainsi que le nom du fichier (dans ce cas-ci : *dispatch*). Le fichier Microsoft Excel est composé de quatre feuilles : *Instructions*, *Data*, *Shipping* et *Result*. La première feuille, disponible avec le bouton *Instructions*, présente les explications à l'utilisateur.

La feuille *Data* (Figure 3) permet d'entrer les caractéristiques des véhicules, les coûts de

**FIGURE 2**

### Fichier Visual Basic



transports ainsi que le nombre d'expéditions. La feuille *Shipping* (Tableau 1) renferme le détail de toutes les expéditions à traiter (numéro de l'expédition, nombre de palettes, poids, revenu généré, destination et revenu de retour potentiel). Les distances entre chacune des villes ont été calculées à l'aide de PC\*Miler sous le critère d'utilisation des routes praticables. Une fois toutes les données entrées dans Microsoft Excel, le bouton *Répartition* permet de résoudre le problème de tournées à l'aide de la méthode développée à la section précédente et programmée en Microsoft Visual Basic.

Une fois la résolution terminée, le résultat global est imprimé à la feuille *Result* et les détails des tournées sont inscrits dans de nouvelles feuilles (FR1, FR2, ...). Chacune d'entre elles contient la feuille de route d'un camion où l'ordre de chargement est déterminé, ce qui établit l'ordre de livraison. De plus, la distance à parcourir, les revenus et les coûts de chaque route sont spécifiés. Une entreprise disposant de plus de temps pourrait trouver la solution optimale à l'aide de Ilog Cplex puisque le programme linéaire correspondant est automatiquement généré.

Figure 3

Fichier Excel, Feuille Data

| Caractéristiques générales                                                                                                                                                              | Précisions pour ce transport                                                                                        |
|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| <p><b>CARACTÉRISTIQUES DE CHACUN DES CAMIONS</b></p> <p>Poids maximal (lbs) : <input type="text" value="46 000"/></p> <p>Nbre de palettes maximal : <input type="text" value="28"/></p> | <p>Nbre d'expéditions : <input type="text" value="16"/></p> <p>Ville de départ : <input type="text" value="1"/></p> |
| <p><b>COÛTS DE TRANSPORT</b></p> <p>\$ / mille : <input type="text" value="1,25"/></p> <p>Arrêt : <input type="text" value="25,00"/></p>                                                | <p><input type="button" value="Inscrire les expéditions"/></p>                                                      |

Tableau 1

Expéditions à répartir

| # Expédition | Nb. Palettes | Nb. Lbs | Revenu    | Destination | Revenu de retour |
|--------------|--------------|---------|-----------|-------------|------------------|
| E01          | 2            | 3 750   | 360,00 \$ | 7           | 400,00 \$        |
| E02          | 3            | 5 800   | 400,00 \$ | 19          | 300,00 \$        |
| E03          | 1            | 2 050   | 400,00 \$ | 34          | 950,00 \$        |
| E04          | 2            | 4 500   | 380,00 \$ | 5           | 200,00 \$        |
| E05          | 1            | 2 000   | 350,00 \$ | 14          | 875,00 \$        |
| E06          | 5            | 6 000   | 650,00 \$ | 21          | 650,00 \$        |
| E07          | 1            | 3 300   | 300,00 \$ | 12          | 300,00 \$        |
| E08          | 3            | 5 700   | 575,00 \$ | 21          | 650,00 \$        |
| E09          | 3            | 5 900   | 406,00 \$ | 16          | 650,00 \$        |
| E10          | 5            | 8 000   | 795,00 \$ | 34          | 950,00 \$        |
| E11          | 4            | 9 500   | 640,00 \$ | 24          | 1 000,00 \$      |
| E12          | 6            | 9 500   | 425,00 \$ | 2           | 540,00 \$        |
| E13          | 5            | 5 000   | 640,00 \$ | 17          | 650,00 \$        |
| E14          | 5            | 5 000   | 395,00 \$ | 15          | 450,00 \$        |
| E15          | 5            | 5 000   | 695,00 \$ | 27          | 1 000,00 \$      |
| E16          | 3            | 7 000   | 675,00 \$ | 11          | 1 300,00 \$      |

La méthode développée a été testée à l'aide des données réelles du Tableau 1 qui correspondent à une journée de travail typique de l'entreprise étudiée. Afin d'évaluer la qualité de la solution proposée par le logiciel, une comparaison a été effectuée avec les résultats obtenus par deux répartiteurs d'expérience et par rapport à la solution optimale obtenue par Ilog Cplex.

La solution du premier répartiteur renfermait une erreur, puisqu'il a surchargé l'un des camions. Le résultat obtenu étant non réalisable, ses suggestions n'ont pas été retenues. Cette situation présente bien l'un des problèmes liés à l'assignation « humaine ». Il est normal que l'humain fasse des erreurs, mais celles-ci peuvent occasionner des pertes de temps considérables. Nous avons eu plus de chance avec le deuxième répartiteur. Après une période de réflexion appréciable, les marchandises ont été divisées correctement entre deux camions (Tableau 2).

**Tableau 2**

**Assignment par un répartiteur d'expérience**

|                              | 1er camion         | 2e camion          | Total              |
|------------------------------|--------------------|--------------------|--------------------|
| <b>Distance parcourue :</b>  | 1 898,90           | 2 329,10           | 4 228,00           |
| <b>Revenus de la route :</b> | 4 365,00 \$        | 4 586,00 \$        | 8 951,00 \$        |
| <b>Coûts d'arrêts :</b>      | 275,00 \$          | 175,00 \$          | 450,00 \$          |
| <b>Coûts de route :</b>      | 2 373,63 \$        | 2 911,38 \$        | 5 285,00 \$        |
| <b>Contribution :</b>        | <b>1 716,38 \$</b> | <b>1 499,63 \$</b> | <b>3 216,00 \$</b> |

Le Tableau 3 présente les résultats de l'application développée. Une solution à deux camions est de nouveau obtenue en des temps de calculs de moins d'une minute (sur un Pentium III, 750Mhz, 128 Mo SDRAM). Puisque le nombre de camions utilisés est identique à la solution précédente, les coûts d'arrêts sont les mêmes. Par contre, la solution proposée par le logiciel a permis de diminuer la distance parcourue de près de 500 milles ce qui réduit le coût des routes de 5 285 \$ à 4 676 \$. De plus, les revenus des routes ont également augmenté. En optimisant les routes, l'application a donc réussi à trouver une destination finale qui offrait des revenus de retour plus élevés. La méthode développée permet ainsi d'augmenter la contribution (profit) de 3 216 \$ (solution du répartiteur) à 4 609 \$, un gain net de 1 393 \$ pour les opérations d'une seule journée de travail.

**Tableau 3**

**Répartition avec l'application développée**

|                              | 1er camion         | 2e camion          | Total              |
|------------------------------|--------------------|--------------------|--------------------|
| <b>Distance parcourue :</b>  | 1 462,20           | 2 278,80           | 3 741,00           |
| <b>Revenus de la route :</b> | 4 141,00 \$        | 5 595,00 \$        | 9 736,00 \$        |
| <b>Coûts d'arrêts :</b>      | 225,00 \$          | 225,00 \$          | 450,00 \$          |
| <b>Coûts de route :</b>      | 1 827,75 \$        | 2 848,50 \$        | 4 676,25 \$        |
| <b>Contribution :</b>        | <b>2 088,25 \$</b> | <b>2 521,50 \$</b> | <b>4 609,75 \$</b> |

Pour terminer, nous avons validé l'optimalité de nos résultats en solutionnant le programme linéaire correspondant à l'aide de Ilog Cplex. Le Tableau 4 présente la solution optimale obtenue après 15 minutes de résolution (sur un Pentium III, 1,26Ghz, 1 800 Mo SDRAM). La solution optimale offre une contribution de 4 716 \$. La solution de la méthode proposée est donc à 2,2% de l'optimum ce qui est excellent compte tenu des algorithmes utilisés.

**Tableau 4**

**Répartition optimale**

|                              | 1er camion         | 2e camion          | Total              |
|------------------------------|--------------------|--------------------|--------------------|
| <b>Distance parcourue :</b>  | 2 359,00           | 1 816,80           | 4 175,80           |
| <b>Revenus de la route :</b> | 5 446,00 \$        | 4 940,00 \$        | 10 386,00 \$       |
| <b>Coûts d'arrêts :</b>      | 225,00 \$          | 225,00 \$          | 450,00 \$          |
| <b>Coûts de route :</b>      | 2 948,75 \$        | 2 271,00 \$        | 5 219,75 \$        |
| <b>Contribution :</b>        | <b>2 272,25 \$</b> | <b>2 444,00 \$</b> | <b>4 716,25 \$</b> |

Le Tableau 5 résume les divers résultats. La solution manuelle du répartiteur d'expérience est celle qui a obtenu les moins bons résultats. Lors de la résolution manuelle, la principale difficulté réside dans le traitement des revenus de retour qui peuvent influencer de façon non intuitive la formation des routes. Dans ce cas-ci, l'application développée améliore la contribution de 30%.

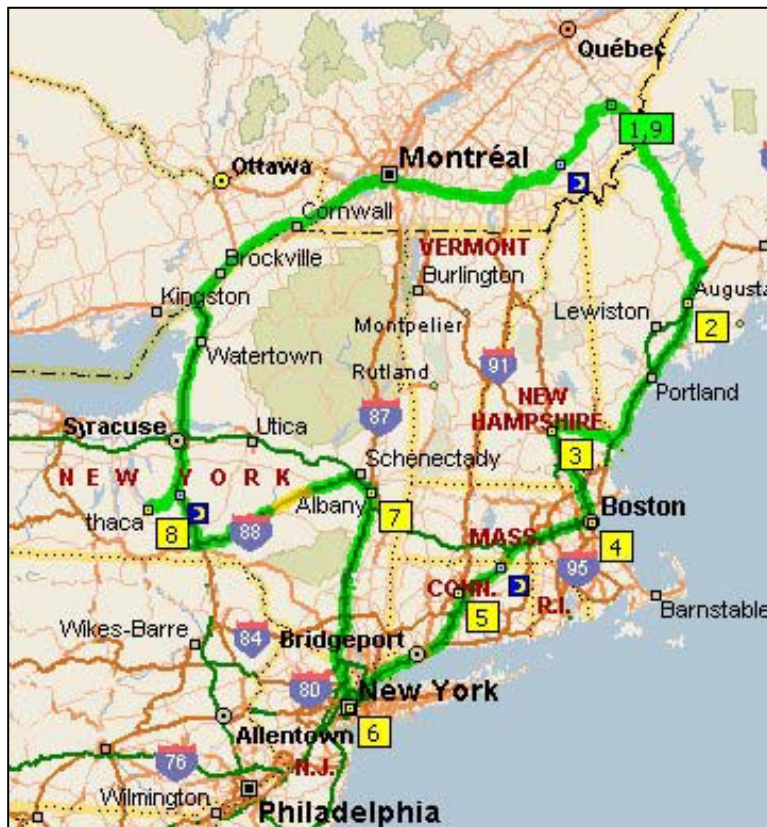
**Tableau 5**  
**Comparaison des solutions**

|                         | Répartiteur        | Application développée | Optimal            |
|-------------------------|--------------------|------------------------|--------------------|
| <b>Milles parcourus</b> | 4228,00            | 3741,00                | 4175,80            |
| <b>Revenus totaux</b>   | 8 951,00 \$        | 9 736,00 \$            | 10 386,00 \$       |
| <b>Coûts d'arrêts</b>   | 450,00 \$          | 450,00 \$              | 450,00 \$          |
| <b>Coûts de route</b>   | 5 285,00 \$        | 4 676,25 \$            | 5 219,75 \$        |
| <b>Contribution</b>     | <b>3 216,00 \$</b> | <b>4 609,75 \$</b>     | <b>4 716,25 \$</b> |
| <b>Amélioration</b>     |                    | <b>30,23%</b>          | <b>2,26%</b>       |

Une fois la répartition terminée, l'application permet à l'utilisateur de visualiser individuellement les routes que les camions auront à parcourir. La Figure 4 présente le détail d'une route à l'aide de Microsoft MapPoint. Les informations de conduite détaillées sur les routes et les sorties à emprunter peuvent être imprimées dans un fichier sur demande.

Figure 4

### Trajet du premier camion



### Conclusion

Nous avons montré de quelle façon divers outils bureautiques peuvent être intégrés afin de proposer une solution logicielle sur mesure. De tels développements permettent aux petites et moyennes entreprises de bénéficier d'un avantage concurrentiel au même titre que les grands joueurs du domaine du transport. De plus, en automatisant une partie de la tâche d'assignation, le répartiteur peut utiliser le temps épargné pour réaliser d'autres activités plus rentables.

La méthode développée a été testée sur un exemple réel. Les résultats produits sont supérieurs à ceux obtenus par des répartiteurs d'expérience en plus de permettre des économies de temps importantes. Nos résultats démontrent que la méthode développée procure une solution à 2,2% de l'optimum avec des temps de calculs négligeables. Dans le futur, nous entendons valider l'approche développée sur plusieurs problèmes tests réels recueillis auprès des transporteurs locaux.

### Remerciements

Nous tenons à remercier M. Jean Guilbault, président du Groupe Guilbault Ltée, pour son intérêt et sa précieuse collaboration envers ce projet, Manac pour la bourse de recherche en transport routier des marchandises dont Marie-Claude Bolduc a bénéficiée en 2002 ainsi qu'un arbitre anonyme pour ses commentaires constructifs.

## Références

“Ameublements Tanguay adopte la solution A.MAZE Routes de GEOCOMtms.” Québec PME (Mai 2002). Disponible au <http://www.quebecpme.ca/Actualites/index.asp?article=656>. [Accès le 13 janvier 2003]

Bodin, L., Golden, B., Assad, A. et Ball, M. “Routing and scheduling of vehicles and crews. The state of the art.” *Computers and Operations Research*, 10, 2, Special Issue, 1983, 63-211.

Bolduc, M.-C. “La distribution de charges partielles : maximisation des revenus nets et planification des routes.” Essai de maîtrise, Faculté des sciences de l’administration, Université Laval, Québec, 2003, à paraître.

“Cancom et Millogiciel intègrent leurs solutions.” *Gestion logistique*, Éditions Bomart, Avril 2002, 40.

Cancom Tracking. Disponible au <http://www.cancomtracking.com>. [Accès le 6 janvier 2003].

Clarke, G. et Wright, J. W. “Scheduling of vehicles from a central depot to a number of delivery points.” *Operation Research*, 12, 1964, 568-581.

Cordeau, J.-F., Gendreau M., Laporte G., Potvin J.-Y. et Semet F. “A guide to vehicle routing.” Document de travail, Centre de recherche sur les transports de Montréal, 2001.

GEOCOMtms. Disponible au <http://www.geocomtms.com/>. [Accès le 31 décembre 2002].

“GEOCOMtms et Maddocks unissent leurs efforts pour intégrer la technologie.” *Gestion logistique*, Éditions Bomart, Décembre 2002, p.88.

Golden, B. L. et Assad, A. A., ed. *Routing: Methods and Studies*. Elsevier Science Publishers B. V., North-Holland, 1988.

Groupe Millobit. Disponible au <http://www.millogiciel.ca/millogiciel.htm>. [Accès le 31 décembre 2002].

Kohl, N. et Madsen, O. B. G. “An optimization algorithm for the vehicle routing problem with time windows based on lagrangian relaxation.” *Operations Research*, 45, 1997, 395-406.

Laporte, G. “The traveling salesman problem: An overview of exact and approximate algorithms.” *European Journal of Operational Research*, 59, 1992a, 231-247.

Laporte, G. “The vehicle routing problem: An overview of exact and approximate algorithms.” *European Journal of Operational Research*, 59, 1992b, 345-358.

Laporte, G. “Recent algorithmic Developments for the traveling salesman problem and the vehicle routing problem.” *Ricerca Operativa*, 23, 68, 1993, 5-27.

Laporte, G. et Osman, I. H. “Routing Problems : A Bibliography.” *Annals of Operations Research*, 61, 1995, 227-262.

Lawler, E. L., Lenstra, J. K., Rinnooy Kan, A. H. G. et Shmoys, D. B. *The traveling salesman problem. A guided tour of combinatorial optimisation*. John Wiley & Sons, 1985.

Lin, S. “Computer solutions of the traveling salesman problem.” *The Bell System Technical Journal*, 1965, 2245-2269.

- Maddocks Systems Inc. Disponible au <http://www.maddocks.ca>. [Accès le 31 décembre 2002].
- Osman, I. H. "Metastrategy simulated annealing and tabu search algorithms for the vehicle routing problem." *Annals of Operations Research*, 41, 1993, 421-451.
- "Purolator choisit le logiciel A.MAZE." *Gestion logistique*, Éditions Bomart, Avril 2002, p.18.
- Rosenkrantz, D. J., Stearns, R. E. et Lewis II, P. M. "An analysis of several heuristics for the traveling salesman problem." *SIAM Journal on Computing*, 6, 3, 1977, 563-581.
- Toth, P. et Vigo D. "Exact solution of the Vehicle Routing Problem.", dans *Fleet Management and Logistics*, ed. Crainic, T. G. et Laporte, G., Kluwer, Boston, 1998, 1-31.
- Yellow, P. C. "A computationnal modification to the saving method of vehicle scheduling." *Operational Research Quarterly*, 21, 1970, 281-283.

## **LOCALISATION D'ENTREPÔTS DES AUTOBUS DE TRANSPORT URBAIN: LE CAS DU RÉSEAU DE TRANSPORT DE LA CAPITALE**

Cet article étudie le problème de localisation d'entrepôts pour les autobus en transport urbain. Nous avons mis au point deux modèles de programmation linéaire permettant de minimiser le kilométrage à vide parcouru par les autobus du Réseau de Transport de la Capitale (RTC). Les résultats obtenus démontrent que des économies appréciables peuvent être réalisées si le RTC implante un nouvel entrepôt.

Cet article évalue la possibilité d'ouvrir de nouveaux entrepôts pour la société de transport en commun de la ville de Québec appelée le Réseau de Transport de la Capitale (RTC). L'environnement du transport en commun, tout comme différents autres secteurs d'activités, est en perpétuel changement. Depuis environ 3 ans, le trafic sur les routes de la ville de Québec est devenu beaucoup plus dense. Par exemple, la circulation sur les autoroutes Henry IV, Duplessis et La Capitale a considérablement augmenté. Cette nouvelle tendance engendre quelques problèmes pour le RTC. Par exemple, les retours au garage ne s'effectuent pas exactement à l'heure prévue à cause de la congestion sur les autoroutes. Cela oblige le RTC à payer des heures supplémentaires imprévues. De plus, il est aussi fréquent que les chauffeurs n'effectuent pas toujours des semaines de travail de 40 heures ce qui provoque une démotivation pour ceux-ci.

S'il est impossible d'éliminer les engorgements de la circulation, il est cependant possible de les éviter. Nous avons donc décidé d'étudier une alternative qui pourrait non seulement aider à réduire l'effet des engorgements du réseau routier mais aussi diminuer le kilométrage à vide parcouru par l'ensemble des autobus. Nous étudierons la possibilité de créer un ou plusieurs entrepôts satellites qui permettront aux autobus de réduire les distances à parcourir pour atteindre les terminus (minimiser le kilométrage à vide) et d'éviter les segments, souvent congestionnés, du réseau routier à l'entour de l'entrepôt actuel.

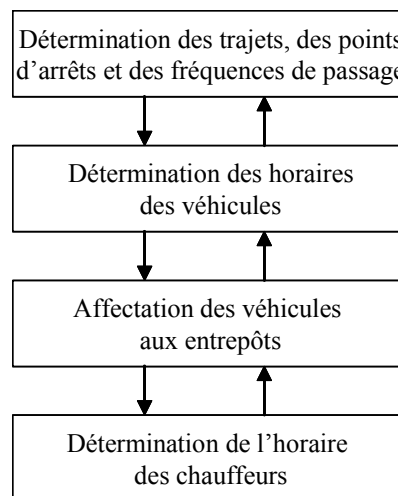
Le RTC a comme mission de fournir à la population des services de transport en commun de qualité, et ce, au meilleur coût possible. Dans la réalisation de sa mission, le RTC vise à contribuer de plus en plus à un environnement sain, à un aménagement urbain de qualité, et au soutien du développement économique, social et culturel de la région. Le transport en commun dans la ville de Québec existe depuis 1854 lorsqu'un groupe de citoyens a doté la ville d'un service de chars tirés par les chevaux. Par la suite, il y a eu des tramways électriques et plusieurs petites entreprises de transport par autobus se sont formées. C'est en 1969 que la STCUQ (Société de Transport de la Communauté Urbaine de Québec) a vu le jour. Par la suite, elle a acquis toutes les entreprises privées de transport en commun de la région. Aujourd'hui, on nomme cette entreprise le Réseau de Transport de la Capitale (RTC). Celle-ci compte une flotte d'environ 500 autobus, une équipe de 693 chauffeurs et 91 parcours distincts. Les autobus effectuent environ 22 393 000 km annuellement. Durant une journée, approximativement 60 000 passagers et passagères sont transportés par les autobus du Réseau de Transport de la Capitale, ce qui représente environ 37,4 millions de passagers annuellement.

L'objectif de ce travail est d'évaluer l'impact de la création d'un ou plusieurs nouveaux entrepôts pour le RTC. Nous nous concentrons sur l'impact sur le kilométrage à vide et sur les économies qui en résultent. Nous analyserons également l'impact d'une telle décision sur l'allègement du trafic sur les artères entourant l'entrepôt actuel. Cependant, nous n'analysons pas l'effet sur le temps supplémentaire des chauffeurs. Ceci nécessiterait d'étudier de façon plus approfondie le problème de l'horaire des chauffeurs ce qui dépasse le cadre de cette étude.

Dans cet article, nous présentons premièrement la littérature relative au transport urbain et les travaux portant sur le problème de minimisation du kilométrage à vide ("*Dead mileage*"). Ensuite, nous présentons deux formulations mathématiques que nous avons élaborées pour résoudre la problématique étudiée. Grâce à la collaboration du Réseau de Transport de la Capitale, nous avons collecté les données nécessaires à l'étude de localisation d'un ou plusieurs garages satellites. Le RTC nous a fourni les coordonnées des 178 terminus dans la ville de Québec, les données relatives à toutes les 623 courses et l'information relative aux coûts d'ouvertures d'un garage satellite dans 3 sites potentiels. Ces données nous ont permis de tester les formulations élaborées. Finalement, une analyse détaillée des résultats sera présentée suivi de notre recommandation.

### Revue de la littérature

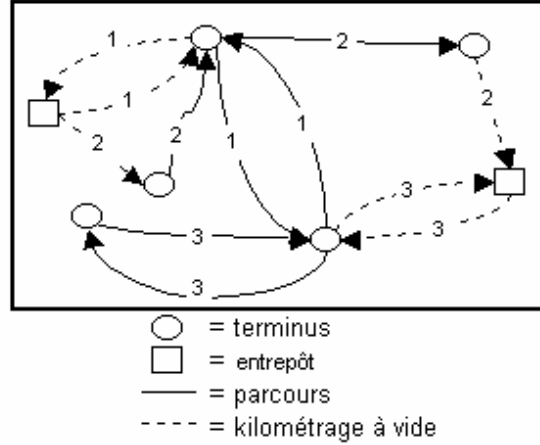
Dans la littérature concernant la planification des opérations du transport en commun, plusieurs sujets sont traités. Ce processus de planification comporte quatre ensembles de décisions qui sont présentés à la Figure 1.



**Figure 1.** Étapes du processus de planification du transport en commun.

La littérature concernant les horaires des trajets et les horaires des chauffeurs est abondante. Nous incluons dans la première étape la conception des trajets, les fréquences (Oudheusden et Zhu, 1995 ; Sinclair et Oudheusden, 1997) et la localisation des points d'arrêts (Bouzaine-Ayari, Gendreau et Nguyen, 2001). En ce qui concerne le problème des horaires des chauffeurs, aussi nommé horaire d'équipage (Paías et Paixao, 1993 ; Ferreira et Guimaraes, 1995), les méthodes utilisées sont habituellement des méthodes heuristiques telles que la méthode tabou et les algorithmes génétiques ou la génération de colonnes. Dernièrement, Lourenço, Paixao et Portugal (2001) ont comparé les algorithmes génétiques et la méthode tabou aux heuristiques utilisées en entreprise. Les résultats obtenus par la méthode tabou et les algorithmes génétiques sont intéressants, rapides et ne nécessitent pas d'ajustements manuels de l'horaire obtenu.

Le problème qui nous concerne ici est celui de l'affectation des véhicules aux entrepôts. Cela est généralement fait de façon à minimiser le kilométrage parcouru pour atteindre, à partir des entrepôts, les points de départ des différents trajets et pour revenir ensuite des points de sorties vers les entrepôts. Dans la littérature, ce problème est appelé le problème de minimisation du kilométrage à vide (*Optimizing dead mileage in urban bus routes*). En d'autres termes, le kilométrage à vide est la distance qui ne procure pas de revenus à l'entreprise. C'est la distance entre les terminus et les entrepôts où l'autobus ne transporte pas de passagers. La Figure 2, représentant un cas fictif (de 3 autobus, 2 entrepôts et 5 terminus), permet de visualiser cette distance.



**Figure 2.** Le kilométrage à vide dans un réseau fictif de transport urbain.

Les premiers auteurs qui ont traité ce problème sont Parkash, Balaji et Tuteja en 1999 et par la suite, Kasana et Kumar en 2000. Le deuxième article ajoute au modèle de Parkash, Balaji et Tuteja la possibilité de considérer la satisfaction de quatre objectifs. Le problème consiste à déterminer l'horaire des autobus pour se rendre aux terminus de chaque route. Deux hypothèses implicites sont prises en compte : un seul terminus (point de départ) est possible sur chaque route  $j$  (il y a plusieurs routes) et le retour vers l'entrepôt doit être du même terminus d'où l'autobus est partie. L'objectif de la formulation proposée est de :

$$\text{Minimiser : } \sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^n d_{ij} x_{ij}, \quad (1)$$

où  $d_{ij}$  représente la distance entre l'entrepôt  $i$  et le point de départ  $j$  (terminus sur la route  $j$ ), tandis que  $x_{ij}$  est le nombre d'autobus effectuant le trajet entre  $i$  et  $j$ . Pour résoudre ce problème, nous supposons avoir les données suivantes : capacité de chaque entrepôt, nombre d'autobus nécessaires sur chaque route et la distance entre les entrepôts et les terminus des routes. Trois types de contraintes doivent être pris en considération :

$$\sum_{j=1}^{n+1} x_{ij} = a_i \quad (i = 1, \dots, m); \quad (2)$$

$$\sum_{i=1}^m x_{ij} = b_j \quad (j = 1, \dots, n+1); \quad (3)$$

$$x_{ij} \geq 0 \quad \forall i, j; \quad (4)$$

La contrainte (2) nous permet d'assurer que le nombre d'autobus stationnés dans l'entrepôt  $i$  n'excède pas sa capacité  $a_i$ . Dans cette contrainte ainsi que les autres contraintes, le trajet numéro  $(n+1)$  est un trajet fictif pour affecter les autobus excédentaires après avoir assuré la demande des

$n$  trajets réels. La contrainte (3) assure que chaque route  $j$  recevra le nombre d'autobus  $b_j$  nécessaire pour répondre à la demande des clients. Finalement, la contrainte (4) est la contrainte de non-négativité pour les variables  $x_{ij}$ .

### Approche de résolution

Dans cette section nous présentons les sites candidats pour localiser les nouveaux entrepôts et les deux formulations mathématiques nous permettant de résoudre le problème de minimisation du kilométrage à vide.

#### Sélection des sites candidats

À l'aide de 13 parcours (représentant 65% du nombre d'aller-retour sur le réseau) nous avons calculé le nombre de sorties et de retours pour chaque terminus utilisé. Nous avons choisi les horaires de la semaine puisque le trafic est plus important. La Figure 3 illustre la densité des départs et des retours sur les terminus du réseau ainsi que la localisation des trois sites candidats.

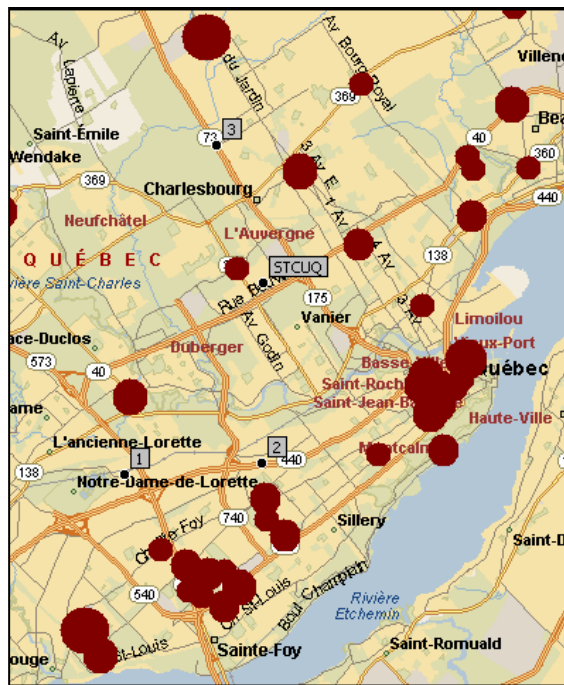


Figure 3. Localisation des sites candidats.

La grosseur des ronds est proportionnelle au nombre d'aller-retour pour chaque terminus. Lorsque nous regardons cette carte, nous pouvons remarquer qu'il y a deux zones où la demande est élevée. Premièrement, à Ste-Foy près du pont de Québec et du pont Pierre Laporte (en bas et à gauche sur la figure). Deuxièmement, il y a aussi une densité élevée dans le centre ville de Québec (au milieu et à droite sur la figure). L'objectif principal est de localiser un ou plusieurs entrepôts dans la ville de Québec tout en minimisant les coûts résultants de cette décision. Cependant, il ne faut pas oublier que nous voulons également éviter le trafic sur les autoroutes 40, 138, 371, 540 et 573. À l'aide d'un rapport du Centre de Développement Économique et Urbain de la ville de Québec nous avons évalué les sites candidats suivants:

- 1- Site Carillon : Situé dans le parc industriel Carillon et d'une superficie de 29 300 m<sup>2</sup>. Le coût d'achat du terrain de ce site est de 215 000 \$.
- 2- Site Jean-Talon Nord : Situé dans le parc industriel Jean-Talon Nord et d'une superficie de 28 500 m<sup>2</sup>. Le coût d'achat est de 1 180 000 \$.

- 3- Site des Carrières : Situé dans le parc industriel des Carrières et d'une superficie totale de 22 000 m<sup>2</sup>. Le coût d'achat est de 77 500 \$.

### Formulation du problème de minimisation du kilométrage à vide

Étant donnée que l'information que nous possédons est en terme de courses, nous formulons le problème de minimisation du kilométrage à vide en conséquence. Une course est un trajet qui commence par un voyage vers un terminus, comprend un ou plusieurs allers-retours sur un ou plusieurs parcours et se termine par un retour vers un entrepôt. Par exemple, la course 1 000 comprend une sortie de l'entrepôt vers le terminus 25 et un retour à l'entrepôt à partir du terminus 14. Précisons que la distance  $d_{ij}$  utilisée dans notre formulation ne comprend pas celle qui est effectuée sur les parcours, c'est-à-dire, on ne considère pas la distance entre l'arrivée au terminus de départ et la sortie du réseau via le terminus de sortie. Pour l'exemple de la course 1 000, la distance  $d_{ij}$  est la somme de la distance entre l'entrepôt et le terminus 25 et la distance entre le terminus 14 et l'entrepôt.

### Premier modèle

Le premier modèle permet d'assigner les courses à un terminus et les autobus reviennent toujours au même entrepôt duquel ils sont partis.

#### Indices :

- $i$  : entrepôt  $i$  ( $i = 1, \dots, m$ )  
 $j$  : course  $j$  ( $j = 1, \dots, n$ )  
 $t$  : période  $t$  ( $t = 1, \dots, T$ )

#### Paramètres :

- $d_{ij}$  : kilométrage à vide (sortie et retour) de la course  $j$  par rapport à l'entrepôt  $i$ ;  
 $c_i$  : capacité de l'entrepôt  $i$ ;  
 $A$  : nombre total d'autobus disponible (pour les  $m$  entrepôts);  
 $S_t$  : ensemble des courses qui partent à la période  $t$ ;  
 $R_t$  : ensemble des courses qui retournent à la période  $t$ ;

#### Variables de décision :

- $x_{ij}$  : variable binaire = 1 si course  $j$  est effectuée à partir de l'entrepôt  $i$ ;  
 sinon = 0;  
 $n_{it}$  : nombre d'autobus à l'entrepôt  $i$  au début de la période  $t$ ;

#### Fonction objectif :

$$\text{Minimiser : } \sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^n d_{ij} x_{ij} \quad (5)$$

#### Contraintes :

$$\sum_{i=1}^m x_{ij} = 1 \quad (j = 1, \dots, n); \quad (6)$$

$$n_{it} = n_{it-1} - \sum_{j \in S_{t-1}} x_{ij} + \sum_{j \in R_{t-1}} x_{ij} \quad (i = 1, \dots, m); (t = 2, \dots, T); \quad (7)$$

$$n_{it} \leq c_i \quad (i = 1, \dots, m); (t = 1, \dots, T); \quad (8)$$

$$\sum_{i=1}^m n_{it} = A \quad (t = 1) \quad (9)$$

$$n_{i1} = n_{iT+1} \quad (i = 1, \dots, m) \quad (10)$$

$$x_{ij} = 0 \text{ ou } 1 \quad (i = 1, \dots, m); (j = 1, \dots, n) \quad (11)$$

La contrainte (6) permet de s'assurer que toutes les courses sont desservies par un et un seul entrepôt. En ce qui concerne la contrainte (7), elle permet de comptabiliser le nombre d'autobus se trouvant à chaque entrepôt  $i$  au début de chaque période  $t$ . La contrainte (8) garantit, qu'à chaque période  $t$ , le nombre d'autobus se trouvant à chaque entrepôt  $i$  ne dépasse pas sa capacité  $c_i$ . Nous devons aussi nous assurer que le nombre total d'autobus du réseau est toujours le même (contrainte 9). Finalement, le nombre d'autobus en début et en fin de journée est le même pour chaque entrepôt (contrainte 10).

## Deuxième modèle

Le deuxième modèle diffère du premier par le fait qu'il permet aux courses de retourner à un entrepôt différent de leur entrepôt de départ.

### Indices :

$i$  : entrepôt  $i$  ( $i = 1, \dots, m$ )  
 $j$  : course  $j$  ( $j = 1, \dots, n$ )  
 $t$  : période  $t$  ( $t = 1, \dots, T$ )

### Paramètres :

$E_{ij}$  : kilométrage à vide (sortie) pour la course  $j$  à partir de l'entrepôt  $i$ ;  
 $F_{ij}$  : kilométrage à vide (retour) pour la course  $j$  vers l'entrepôt  $i$ ;  
 $c_i$  : capacité de l'entrepôt  $i$ ;  
 $A$  : nombre total d'autobus disponible (pour les  $m$  entrepôts);  
 $S_t$  : ensemble des courses qui partent à la période  $t$ ;  
 $R_t$  : ensemble des courses qui retournent à la période  $t$ ;

### Variables de décision :

$X_{ij}$  : variable binaire = 1 si la sortie de la course  $j$  est effectuée à partir de l'entrepôt  $i$ ;  
 sinon = 0;  
 $Y_{ij}$  : variable binaire = 1 si le retour de la course  $j$  est vers l'entrepôt  $i$ ;  
 sinon = 0;  
 $n_{it}$  : nombre d'autobus à l'entrepôt  $i$  au début de la période  $t$ ;

### Fonction objectif :

$$\text{Minimiser : } \sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^n E_{ij} X_{ij} + \sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^n F_{ij} Y_{ij} \quad (12)$$

### Contraintes :

$$\sum_{i=1}^m X_{ij} = 1 \quad (j = 1, \dots, n); \quad (13)$$

$$\sum_{i=1}^m Y_{ij} = 1 \quad (j = 1, \dots, n); \quad (14)$$

$$n_{it} = n_{it-1} - \sum_{j \in S_{t-1}} X_{ij} + \sum_{j \in R_{t-1}} Y_{ij} \quad (i = 1, \dots, m); (t = 2, \dots, T); \quad (15)$$

$$n_{it} \leq c_i \quad (i = 1, \dots, m); (t = 1, \dots, T); \quad (16)$$

$$\sum_{i=1}^m n_{it} = A \quad (t = 1) \quad (17)$$

$$n_{i1} = n_{iT+1} \quad (i = 1, \dots, m) \quad (18)$$

$$X_{ij} = 0 \text{ ou } 1 \quad (i = 1, \dots, m); (j = 1, \dots, n); \quad (19)$$

$$Y_{ij} = 0 \text{ ou } 1 \quad (i = 1, \dots, m); (j = 1, \dots, n); \quad (20)$$

La contrainte (13) assigne à chaque course un seul entrepôt de sortie. De même, la contrainte (14) assigne à chaque course un à seul entrepôt de retour. Pour ce qui est de la contrainte (15), elle permet de compter le nombre d'autobus se trouvant à chaque entrepôt  $i$  au début de la période  $t$ . Ce nombre de véhicules ne doit pas être supérieur à la capacité  $c_i$  de l'entrepôt (contrainte 16). Nous devons aussi nous assurer que le nombre total d'autobus du réseau est toujours le même (contrainte 17). Finalement, le nombre de véhicules en début et en fin de journée doit être le même pour chaque entrepôt (contrainte 18).

Les deux modèles font l'hypothèse que le départ de chaque autobus de l'entrepôt et son retour se font dans deux périodes différentes ce qui pourrait engendrer des erreurs si les périodes de temps étaient trop longues. Il est donc important lors de la détermination de la durée des périodes de temps de donner à celle-ci une durée inférieure à la durée de la plus courte course. De plus, le début de la première période doit précéder le départ de la première course de la journée.

### Application des modèles au RTC

Les deux modèles développés ont été appliqués aux RTC, soit à 178 terminus, 623 courses et 48 périodes. Les distances entre les quatre entrepôts (l'entrepôt actuel et les trois entrepôts candidats) et les terminus ont été calculées à l'aide du logiciel MapPoint. De plus, en considérant que la vitesse moyenne d'un autobus est de 20 km/heure et que le coût d'utilisation du véhicule est de 20 \$/heure additionnée au coût de main d'œuvre de 50 \$/heure (comprenant salaire, formation, habillement, etc.), on obtient un coût au kilométrage de 3,5 \$/km.

Les coûts pour l'ouverture d'un nouvel entrepôt comprennent des coûts fixes et variables. Les coûts fixes sont le coût du terrain, le coût de construction du bâtiment des services administratifs et le coût d'équipements. Les coûts variables dépendent de la capacité de l'entrepôt à ouvrir et sont calculés en considérant un espace d'entreposage de 53,5 m<sup>2</sup> pour chaque autobus. Ces coûts ont été déterminés en concertation avec les responsables du RTC. En résumé, les coûts pertinents pour notre étude sont les suivants :

#### Coûts fixes :

|                                                   |                       |
|---------------------------------------------------|-----------------------|
| Terrains :                                        | selon le site choisi; |
| Coûts des équipements :                           | 860 000 \$;           |
| Coûts de construction (services administratifs) : | 2 580 000 \$;         |

#### Coûts variables :

|                                                                     |                     |
|---------------------------------------------------------------------|---------------------|
| Coûts de construction (par véhicules) :                             |                     |
| 53,5 m <sup>2</sup> /véhicule $\times$ 1 040,72 \$/m <sup>2</sup> = |                     |
| 55 680 \$/véhicule;                                                 |                     |
| Coûts de construction additionnels si plus de 100 véhicules         | 25 810 \$/véhicule; |

#### Coûts annuels :

|                                                            |                    |
|------------------------------------------------------------|--------------------|
| Coûts d'opérations :                                       | 507 525 \$/an;     |
| Coûts d'opérations additionnels si plus de 100 véhicules : | 5 075 \$/véhicule; |

Nous avons choisi d'analyser les 5 scénarios suivants :

- A. Site actuel seulement;
- B. Tous les sites (RTC, Carillon, Jean-Talon Nord et Carrières)
- C. Site actuel + Site Carillon;
- D. Site actuel + Site Jean-Talon Nord;
- E. Site actuel + Site des Carrières.

La durée de la plus petite course est de 53 minutes (course 1 193). Nous divisons donc la journée en 48 périodes de 30 minutes. De cette façon, nous nous assurons qu'il n'y a aucune course qui sorte et revienne durant la même période. De plus, la première course de la journée (la course 2 000) doit être au terminus 45 à 5h21. Ce terminus est à 10,68 km de l'entrepôt, donc l'autobus prendra 32 minutes (i.e.: 20 km/h) pour s'y rendre. Elle doit donc quitter l'entrepôt à 4h49. Nous avons donc décidé de faire débiter la première période à 4h00.

En utilisant le premier modèle et un seul entrepôt qui est l'entrepôt existant, nous reproduisons la situation actuelle. Ainsi nous obtenons une solution dont le kilométrage à vide est de 3 066 747 km et qui nécessite une capacité d'entreposage de 344 autobus. Ce résultat a été validé par les responsables du RTC. Le Tableau 1 présente les résultats de ce scénario (scénario A) et chacun des quatre autres scénarios.

**Tableau 1.** Kilométrage à vide, capacité d'entreposage et économies d'opérations selon le premier modèle

| Scénario | Km à vide | Capacités nécessaires (véhicules) |            |          |           | Économie (an)  |
|----------|-----------|-----------------------------------|------------|----------|-----------|----------------|
|          |           | RTC                               | Jean-Talon | Carillon | Carrières |                |
| A        | 3 066 747 | 344                               |            |          |           | -              |
| B        | 2 552 321 | 131                               | 32         | 85       | 97        | 277 916 \$/an  |
| C        | 2 823 049 | 246                               | 97         |          |           | 345 418 \$/an  |
| <b>D</b> | 2 715 287 | 242                               |            | 107      |           | 687 060 \$/an  |
| E        | 2 932 397 | 240                               |            |          | 101       | - 42 375 \$/an |

Les économies d'opérations annuelles sont calculées de la façon suivante : (kilométrage à vide actuel – kilométrage à vide du scénario)  $\times$  3,5 \$/km – coûts d'opérations annuels des entrepôts à créer. À titre d'exemple, les économies d'opérations annuelles du scénario B sont calculées comme suit :  $(3\,066\,747 - 2\,552\,321) \times 3,5 - (3 \times 507\,525)$ .

Afin de compléter notre analyse, nous devons prendre en considération les coûts de d'investissement pour l'implantation des nouveaux entrepôts (achat du terrain et construction de nouvelles bâtisses). Le tableau 2 présente ces coûts pour les scénarios B, C, D et E.

**Tableau 2.** Coûts d'investissement (Premier modèle)

| Scénario | Coûts d'investissement |              |              | Ratio<br>(Coûts / Éco.) |
|----------|------------------------|--------------|--------------|-------------------------|
|          | Jean-Talon             | Carillon     | Carrières    |                         |
| B        | 6 401 760 \$           | 8 387 800 \$ | 8 918 460 \$ | 85,31 ans               |
| C        | 10 020 960 \$          | -            | -            | 29,01 ans               |
| D        | -                      | 9 793 430 \$ | -            | 14,25 ans               |
| E        | -                      | -            | 9 166 990 \$ | <b>négatif</b>          |

Le scénario D est celui dont les coûts d'investissement sont les plus rapidement rentabilisés. En effet, en faisant l'hypothèse d'un taux d'intérêt annuel de 0% afin de simplifier le calcul, après 14,25 ans d'exploitation l'entrepôt d'une capacité de 107 véhicules sera rentabilisé. Donc si le RTC ouvre un nouvel entrepôt dans le parc Carillon, il lui procurera environ 10,3 millions d'économie en 15 ans, ce qui est supérieur aux coûts d'investissement.

Concernant l'allègement du trafic sur les artères entourant l'entrepôt actuel, il est évident qu'en réduisant le nombre d'autobus opérant à partir de cet entrepôt, on réduit approximativement

le trafic dans les mêmes proportions. Selon le scénario D, le nombre d'autobus basé à l'entrepôt actuel diminue de 344 autobus (scénario A) à 242 autobus (scénario D), une réduction de 30%.

Il pourrait s'avérer intéressant d'appliquer le scénario D avec une capacité inférieure à 107 autobus. Cela nous permettrait de rentabiliser plus rapidement cet investissement. Il est possible que la diminution des coûts de construction engendrée par la diminution de la capacité soit relativement plus importante que les économies. Le Tableau 3 analyse la possibilité de diminuer la capacité à 100, 90, 80 et 70 véhicules. On remarque donc que le scénario D avec une capacité de 80 autobus semble être celui qui procure un rendement sur investissement le plus intéressant.

**Tableau 3.** Rapport coût d'investissement / économies d'opérations du scénario D avec des différentes capacités (Premier modèle)

| Économie   | Capacité | Coûts totaux | (Coûts / Éco.) |
|------------|----------|--------------|----------------|
| 714 122 \$ | 100      | 9 223 000 \$ | 12,91 ans      |
| 706 790 \$ | 90       | 8 666 200 \$ | 12,26 ans      |
| 665 255\$  | 80       | 8 109 400 \$ | 12,19 ans      |
| 610 777 \$ | 70       | 7 552 600 \$ | 12,37 ans      |

L'application du deuxième modèle donne les résultats présentés au Tableau 4. Le tableau montre qu'en relaxant l'hypothèse qui obligeait les autobus à revenir au même entrepôt nous pouvons réduire davantage le kilométrage à vide et ainsi obtenir des économies beaucoup plus intéressantes. Le tableau montre que le scénario D permet des économies d'opérations de 1 441 947\$/an. Le Tableau 5 présente les coûts d'investissement pour les 5 scénarios évalués et montre que le scénario D donne le plus bas rapport entre le coût d'investissement et les économies annuelles.

**Tableau 4.** Kilométrage à vide, capacité d'entreposage et économies d'opérations selon le deuxième modèle

| Scénario | Km à vide | Capacités nécessaires (véhicules) |            |          |           | Économie (an)   |
|----------|-----------|-----------------------------------|------------|----------|-----------|-----------------|
|          |           | RTC                               | Jean-Talon | Carillon | Carrières |                 |
| A        | 3 066 747 | 344                               |            |          |           | -               |
| B        | 2 165 163 | 92                                | 36         | 103      | 120       | 1 516 224 \$/an |
| C        | 2 652 023 | 233                               | 119        |          |           | 847 584 \$/an   |
| <b>D</b> | 2 469 155 | 216                               |            | 128      |           | 1 441 947 \$/an |
| E        | 2 796 534 | 211                               |            |          | 133       | 270 745 \$/an   |

**Tableau 5.** Coûts d'investissement (Deuxième modèle)

| Scénario | Coûts d'investissement |               |               | Ratio<br>(Coûts / Éco.) |
|----------|------------------------|---------------|---------------|-------------------------|
|          | Jean-Talon             | Carillon      | Carrières     |                         |
| B        | 6 624 480 \$           | 9 467 470 \$  | 10 715 300\$  | 17,68 ans               |
| C        | 11 736 310 \$          | -             | -             | 13,85 ans               |
| D        | -                      | 11 504 720 \$ | -             | 7,98 ans                |
| E        | -                      | -             | 11 774 670 \$ | 43,49 ans               |

Le Tableau 6 résume les économies réalisables pour des différentes capacités d'entreposage du scénario D. Les résultats démontrent que, toujours avec l'hypothèse d'un taux

d'intérêt nul, nous pourrions rentabiliser un entrepôt de 90 autobus situé dans le parc Carillon en 6,09 ans

### Conclusion

Dans cet article, nous avons montré que la société de transport en commun de la ville de Québec, le RTC, peut réaliser des économies en implantant un nouvel entrepôt dans la ville de Québec. Le kilométrage à vide avec l'entrepôt actuel est de 3 067 000 km, tandis que le scénario D permet de le réduire à 2 732 000 km (premier modèle) et à 2 515 000 km (deuxième modèle). L'ouverture d'un entrepôt dans le parc Carillon nécessiterait une bâtisse d'une capacité de 90 véhicules aux coûts de 8 666 200 \$.

**Tableau 6.** Rapport coût d'investissement / économies d'opérations du scénario D avec des différentes capacités (Deuxième modèle)

| Économie     | Capacité | Coûts totaux | (Coûts / Éco.) |
|--------------|----------|--------------|----------------|
| 1 506 770 \$ | 100      | 9 223 000 \$ | 6,12 ans       |
| 1 424 097 \$ | 90       | 8 666 200 \$ | 6,09 ans       |
| 1 315 678\$  | 80       | 8 109 400 \$ | 6,16 ans       |
| 1 206 114\$  | 70       | 7 552 600 \$ | 6,26 ans       |

Le problème du kilométrage à vide, tel que nous l'avons formulé, peut être résolu à l'aide des logiciels d'optimisation commerciaux dû à sa structure mathématique. Le logiciel qui a été utilisé tout au long de cette étude est CPLEX 6.6.0. Le nombre de variables varie entre 671 et 2 612 pour le premier modèle et entre 1 294 et 5 104 pour le deuxième modèle. Bien que le nombre de variables soit élevé, nous avons pu remarquer que le temps de résolution est très faible, quelques secondes seulement. Finalement, les résultats obtenus démontrent l'intérêt d'une telle étude pour le Réseau de Transport de la Capitale.

### Remerciements

Cette recherche a été partiellement financée par les subventions OGP0036509 et OGP0172633 du Conseil de Recherche en Sciences Naturelles et en Génie du Canada (CRSNG) que nous remercions. Nous tenons aussi à remercier M. Paul André Robert du Réseau de Transport de la Capitale pour son intérêt et sa collaboration envers ce projet ainsi qu'un arbitre anonyme pour ces commentaires constructifs.

## Références

- Bouzaine-Ayari B., M. Gendreau and S. Nguyen (2001), Modeling bus stops in transit networks : A survey and new formulations, *Transportation Science*, 35, 304-321.
- Ferreira, J., and R. Guimaraes (1995) A travelling salesman model for the sequencing of duties in bus crew rotas, *Journal of the Operational Research Society*, 46, 4, 415-426.
- Kasana H.S. and K.D. Kumar (2000), An efficient algorithm for multiobjective transportation problems", *Asia-Pacific Journal of Operational Research*, 17, 27-40.
- Lourenço H.R., J.P.Paixao and R. Portugal (2001) Multiobjective metaheuristics for the bus driver scheduling problem, *Transportation Science*, 35, 331-343.
- Oudheusden, D. and W. Zhu (1995) Trip frequency scheduling for bus route management in Bangkok, *European Journal of Operational Research*, 83, 3, 439-451.
- Paias, A., and J. Paixao (1993) State space relaxation for set covering problems related to bus driver scheduling, *European Journal of Operational Research*, 71, 2, 303-316.
- Prakash S., B. Balaji and D. Tuteja (1999) Optimizing dead mileage in urban bus routes through a non-dominated solution approach, *European Journal of Operational Research*, 114, 465-473.
- Sinclair, M. and D. Oudheusden (1997) A network approach to trip frequency scheduling for bus routes in heavily congested cities, *European Journal of Operational Research*, 103, 1, 18-27.

## **A FRAMEWORK FOR MANAGING A NEW COMPLEX PRODUCT DEVELOPMENT PROJECT: A CASE STUDY APPROACH<sup>1</sup>**

Literature on new product development (NPD) typically focuses on decision-making processes of successful innovative firms that develop new products for commercial use. However, little information is available that is specific to the process of complex product development. This paper examines an NPD project from the perspective of the Canadian Defence Organization. Using a case study approach, the paper explores the rationale behind utilizing internal and external sources of innovation to address the product's inherent technological complexity and proposes a conceptual framework.

### **Introduction**

Globalization and the associated rise in competitive challenge have created a need for managers in the manufacturing industry to implement strategies that continually improve the quality of existing products, manufacturing processes, and new product development (NPD) in order to remain competitive. Literature on new product development typically focuses on processes to develop new products from idea to market with fewer mistakes as a solution to develop successful product(s). The NPD-centric focus arises from the fact that three-out-of-four product development projects end up in commercial failure (Cooper, 1990). Consequently, billions of dollars end up being wasted, having tremendous impact on the bottom-line of firms.

Successful innovative firms have understood the important role that the NPD project management plays in ensuring success. Firms such as 3M, GM, and Northern Telecom have adopted some kind of NPD process (Cooper, 1990) to cope with the uncertainties associated with NPD project management. To date, a great deal of research has focussed on new product development for commercial use. However, little work has been done on NPD process involving especially complex product systems such as satellites, fighter jets, or battle tanks. These complex product development processes in defence manufacturing often use project management tools such as planning and scheduling, Integrated Product Development, and Integrated Product Teams (Valdez and Kleiner, 1996). The objective of this paper is to examine the management of NPD projects from the perspective of the Canadian Defence Organization. The paper consists of a literature review, followed by the presentation of a case study pertaining to the development of a surveillance vehicle for the Canadian Defence Organization. A conceptual framework pertaining to complex product development is discussed and conclusions are presented.

---

<sup>1</sup> The authors would like to thank the anonymous reviewers for ASAC Halifax 2003 who provided valuable suggestions to improve the quality of the paper.

## Literature Review

The management of NPD originated from the strategic intent to fit the organization's new product development goals with its resources and competencies. In order to receive a favorable return on investment (ROI) made in the new product development a firm's NPD strategy must meet two critical objectives: minimize time-to-market (cycle time) and maximize the fit between customer requirements and product characteristics. Successful NPD requires attention to four strategic issues namely technology strategy (or NPD Process), organizational context, construction and use of teams, and the use of tools for improving the NPD process (Schilling and Hill, 1998). These factors are critical in a market environment characterized by rapid product obsolescence.

The traditional model of NPD process is the linear model or sequential model (Kline and Rosenberg, 1986). This model assumes that the activity flows smoothly from one stage to the next; the process starts with research, proceeds to development and production and concludes with the marketing stage. However, in reality, the traditional model has severe limitations when applied to new product development. Particularly, (1) the assumption of a linear NPD process does not always match with the actual non-linear process and (2) the implicit assumption that once the development process for a new product starts, its smooth passage through all of the model's stages may not always be valid. Cooper's Stage-Gate Model is a popular framework of the NPD process practiced by firms such as DuPont, 3M, HP, P&G, Dow Chemicals, Northern Telecom, ICI-UK, IBM, Polaroid, Black & Decker, Exxon Chemicals, Corning and many others to develop new products. Usually, Stage-Gate systems involve four to seven discrete stages and gates, depending on the firm. The development of a new product is reviewed at each gate and a "go-kill" decision is taken (Cooper, 1994). Generally, the quality of information available at each succeeding stage increase, resulting in better risk assessment that in turn optimizes further commitment of expensive resources such as funds and manpower. Though the Stage-Gate model overcomes many basic limitations of the traditional model, it still suffers from the assumption of linearity. The chain-linked model (Kline and Rosenberg, 1986) overcomes the linearity assumption of the previous frameworks. The central path of this model is the central chain-of-innovation that begins with design and continues through development and production to marketing. The secondary chains are the series of feedback paths that repeat the steps and also connect back directly from perceived market needs and potential for improvement of product and service performance in successive design steps. The NPD process is possible due to the accumulated knowledge bases and development of further capabilities requires additional research. This framework captures the complex interaction among the central path of NPD, knowledge base and research and implicitly points out the project management concepts in the production process. Kumar *et al.* (1994) studied the innovation process in the Canadian electronic and telecommunication industry from the producer's perspective and proposed an activity-stage innovation model. Their model not only overcomes the weaknesses of the traditional model and recognizes the importance of "Quality Assurance (QA)" in the innovation process. The QA in the innovation process ensures that the product conforms to the initial specifications and the customer actually gets the promised product. Further, QA helps in developing the acceptance criteria from information such as regulations to which the product must conform and determines how the company intends to meet these criteria. It also ensures job quality by checking the validity of the design and performing qualification tests at the prototype stage and stresses clarity of information and the need to properly document all activities. This model captures the fundamental concept of market acceptance of high technology products. Quality is one of the major factors of product acceptance/success in the high technology market often resulting in the imposition of a price premium.

Cooper's Stage-Gate Model is a sequential process that tries to maximize the fit between customer requirements and product characteristics. A sequential process has no early warning system to indicate that the planned features are not manufacturable. As a result, it fails to reduce the cycle time as the new product development iterates between product design and process

design stages (Schilling and Hill, 1998). The other NPD strategies typically make use of some kind of parallel process to reduce the cycle time while maximizing the fit between customer requirements and product characteristics. Concurrent engineering is a good example of parallel processing that decreases the product development time and achieves smooth transition from product design to production. It fulfills the two critical objectives of NPD strategy as suggested by Schilling and Hill (1998) by reducing cycle time and improving manufacturability. Improvement in manufacturability in turn results in maximizing the fit between customer requirements and product characteristics.

All these frameworks (or models) share a common characteristic in that they are market-centric and developed for commercial products. This fact is evident from the criteria used to determine the success of new products. Success is often based on financial or marketing metrics such as ROI, market share, and market growth. The market-centric focus of these models may be a limitation when they are applied to NPD process in the defence sector. Unlike the commercial sector, the defence sector typically has a single customer focus where technical performance is valued far more than cost competitiveness. The ultimate customer or end user of the product is the “soldier” and the capabilities of the product may mean the difference between life and death. The critical nature of the defence sector’s business and the capabilities they seek usually decides the performance requirements, the degree of user involvement in the NPD process and their claim on technical and intellectual rights, all factors that inhibit commercialization. Another peculiarity that is unique to this sector often lies in the nature of the product itself. Defence products are usually large, complex product systems (CoPS) such as Unmanned Aerial Vehicles (UAV), Underwater Mine Disposal (UMD), military satellites, and other major weapon systems (Hollington, 1998; Hobday and Rush, 1999; Briggs and Kleiner, 2002). These CoPS are not a single product but a set of products and processes integrated to perform as a single system. In fact, they can be rightly considered as systems within systems. According to Hobday and Rush (1999), the complex product systems are “high value products, systems, capital goods, control units, networks and high technology constructs. They tend to be made in one-off projects or small batches and the emphasis of production is on design, project management, systems engineering and systems integration”. Such NPD processes are also known as platform projects (Schilling and Hill, 1998).

The successful development of such complex products calls for effective project management techniques such as IPD (Valdez and Kleiner, 1996), IPT (Valdez and Kleiner, 1996; Briggs and Kleiner, 2002), Computer aided design and engineering (CAD, CAE) and manufacturing resource planning (Hobday and Rush, 1999). Technology acquisition plays a major role in new complex product systems development projects. Technology acquisition is defined as “the adoption of new technology in the form of knowledge, techniques, and physical components” (Durrani *et al.*, 1999). It is a multi-stage decision process that links technology sourcing activities, product development activities and strategic management processes. The technology acquisition decision model for commercial products takes into account the customer preferences, technological capabilities of the company and technology sourcing (Durrani *et al.*, 1999). As mentioned earlier, the defence sector has a single customer focus, and in this specific case the customer preference parameter can be eliminated giving rise to a two-dimensional technology acquisition model based on technological capabilities and technology sourcing. Unlike the commercial sector, the new complex product systems development for national defence values technical performance far more than cost competitiveness. This defines the technology acquisition strategy for sub-systems of the new complex product systems within the space defined by technological capabilities (core and future core) and technology acquisition source (internal, alliance, and external). Each cell of the technology acquisition decision model defines the technology solution and influences the acquisition strategy. The technology acquisition strategy takes into account various decision criteria such as time, cost, risk, organization viability, organization learning, core competencies and ability to protect technology (proprietary, and non-proprietary). Also it considers various technology assessment criteria such

as technology maturity, skills/competency, degree of difficulty/risk, potential of technology, uncertainty, and accessibility (Durrani *et al.*, 1999).

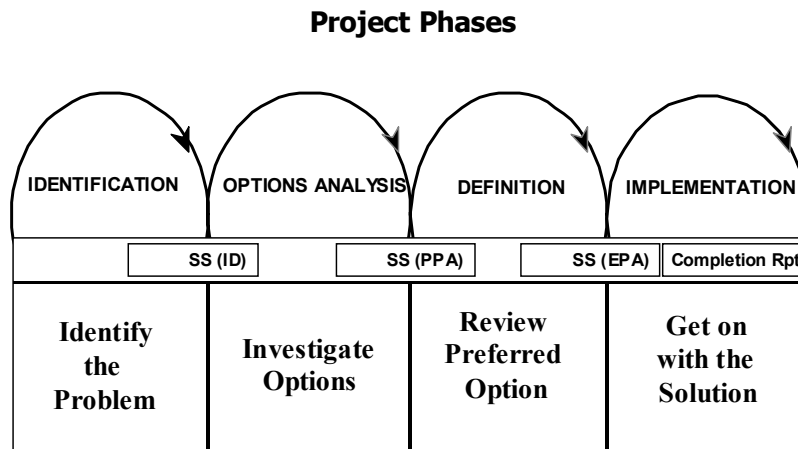
The most common definition of *Integrated Product Development* (IPD), according to Valdez and Kleiner (1996) comes from US Air Force Material Command Guide on Integrated Product Development. IPD is defined as: “A philosophy that systematically employs a teaming of functional disciplines to integrate and concurrently apply all necessary processes to produce an effective and efficient product that satisfies customers’ needs.” The IPD approach focuses on products as well as customers. The product focus integrates technical, performance requirements, and traditional project tools such as planning and scheduling. It makes use of multidisciplinary *Integrated Product Teams* (IPT) that are cross-functional in design and include customers and end users. The IPTs measure their progress and performance based on *Technical Performance Measurements* (TPM), which are the product attributes crucial to the customer (Valdez and Kleiner, 1996). The use of IPTs in the development of military products is commonplace. The acquisition of military satellites by US Air Force is one such successful application of the IPT concept in the context of defence services (Briggs and Kleiner, 2002). The objective of IPD and IPT is to reduce cycle time, cost, effort, risks, and uncertainties associated with new product development (Valdez and Kleiner, 1996; Briggs and Kleiner, 2002). Traditionally, project management is regarded as a management process with specialized planning, monitoring and control techniques and applied to project oriented industries such as construction, engineering and defence. However, project management is increasingly accepted as a multi-perspective-concept to provide effective intra-organizational integration and optimal utilization of scarce resources by integrating diverse concepts such as organizational behavior, project communication, project context and project content (Cicmil, 1997).

According to Cicmil (1997), the reasons for using project management techniques arise from optimal utilization of available resources (time, money and people), expansion of knowledge that requires an effective organizational design to support knowledge management for competitive advantage through intra-organizational integration. It also establishes “win-win” partnerships through inter-organizational networking, and incorporation of a disciplined approach to effective product development and management of innovation, knowledge and skills to gain competitive advantage by getting the right product, in right time, to market. Another dimension to be considered in the context of new product development by defence services is their internal capability to develop complex products such as weapon systems. Defence services normally have the knowledge base to frame basic engineering specifications, produce performance requirements, conduct field-testing of prototypes and possess adequate project management capability to co-ordinate the development of complex products. External capabilities such as design, development, and production must be out-sourced by sub-contracting the design, development and production of the weapon systems to large firms that are known as “*prime contractors*” (or *primes*). It is a common practice for a “*prime*” to subcontract a part of the contract to other smaller firms. The process of contracting the design, development and production of complex systems under the overall project management framework agrees with the conclusions reached by Graham and Ahmed (2000) in their study of the aerospace value chain. Graham and Ahmed (2000) cited the Ministry of Defence document (cmnd 2800, 1995) to emphasize the fact that “*the Ministry of Defence (MoD) places most large aerospace contracts in the hands of a single prime contractor*”. Similarly, the Canadian Department of National Defence (DND) uses a well-established acquisition process to award substantial contracts to its contractors to develop major projects such as a weapon system. This process is described in detail in the following section.

### **DND Acquisition Process**

This section outlines the process that must be followed by the DND when developing (or acquiring) a major system. The adoption of technology within the Canadian Forces is predominantly accomplished under the auspices of a capital project for the acquisition (development and induction) of new equipment. Annually, the Canadian Forces spends in excess

of \$1B CDN on acquisition of major systems. In order to ensure the greatest value for these expenditures, a stage-gate process based macro model of DND Acquisition Process is stated in departmental documentation which is shown in Figure 1 below. Each phase is composed of a discrete set of activities. The phase culminates with a decision point where the appropriate level of senior authority gets to make one of three decisions; 1) approve passage of the project to the next stage, 2) make direct modification to the project prior to reconsideration or, 3) terminate the project. The formalized method for seeking the decision is through the submission of a Synopsis Sheet (SS) covering either identification (SS(ID)), preliminary project approval (SS(PPA)), or effective project approval (SS(EPA)). The synopsis sheet is considered to be an iterative document that is further developed with each successive phase of the project.



**Figure 1: Macro Model of DND Acquisition Process**

**Identification Phase.** Activities within the *identification phase* are the responsibility of the project sponsor. The principle activity of this phase is the identification and definition of the capability deficiency that is addressed by the project. The deficiency could come from the wearing out of the present equipment, or significant advances in technology that could render the equipment obsolete. The deficiency could also come from recognized changes in policy, procedure, or threat. Typically, the deficiency is characterized by several of the above-mentioned factors. Knowledge about the deficiencies is obtained not only from the users of the current equipment, but also from Canada's allies, who are consulted about the developments taking place in their defence forces, and also from the research and development community, both within and outside the department. Other activities within this phase include the identification of potential solutions to the deficiency in broad terms, preparation of a rough order of magnitude (ROM) cost estimate for the project, and preparation of an initial risk assessment. Potential suppliers of solutions are often initially contacted during this stage to help define possible solutions and provide initial cost estimates. At this stage solutions are not limited to equipment acquisition only. Other innovative solutions such as changes in process and alternate uses for other existing equipment are also considered. Two important project documents are initiated during this phase: the project charter and the *statement of operational requirement* (SOR). Both these documents are considered to be "*living documents*" and mature throughout the project. The project charter establishes the initial scope of the project in terms of key objectives, resources, constraints, schedule, and milestones. It defines the roles and responsibilities of the major stakeholders and the project team. It outlines the reporting relationships and authority for all members of the project organization. The SOR contains the critical performance criteria against which options will eventually be evaluated, and is used to communicate the operational requirement to technical and procurement staff. It becomes more definitive as the project progresses and options are

developed and investigated. A Key step to this process is the use of *scenario testing* and *operational research analysis*.

**Option Analysis Phase.** Upon moving into the *option analysis phase*, the project comes under broader departmental and, if deemed appropriate, government scrutiny. One of the first activities of the phase is the formation of a *senior review board* (SRB), made up of representatives of the principal organizations of the department interested in, or implicated by, the project. One of their initial actions is to review and approve the project charter. They subsequently are involved in reviewing and approving or recommending approval of all key documents and project milestones. The key activity in this phase is the analysis of the potential options of the identified deficiency to determine the preferred course of action for detailed development in the next phase. The output of this analysis is used to further the development of the SOR by using resources such as the departmental operational research staff (systems analysis and operational research) and research and development (assessment of the technological risks). However, embarkation into significant R&D activity at this time carries with it the probable penalty of significant impact on project schedule. Option analysis does not limit itself uniquely to performance considerations. Option costing is a critical element of the analysis. This includes acquisition costs of equipment and total life cycle costing. Additionally, factors of political, socio-economic, and environmental nature are taken into consideration. It is during the option analysis phase that a *project profile and risk assessment* (PPRA) is prepared for projects of high cost or great risk. This document describes how the project fits into the broader strategic context of the department, the roles and reporting relationships of the various oversight bodies, the impact of any agreement with another agency or government, and the results of the current risk assessment. The risk assessment should identify both external and internal risks and propose risk mitigation strategies. The option analysis phase terminates with the submission and approval of the *synopsis sheet (preliminary project approval)* (SS(PPA)). Acceptance of the SS(PPA) provides approval in principle for the preferred option, the anticipated total cost of the project, and the resulting personnel and life cycle implications of the project, and provides expenditure authority for the resources necessary for the project to proceed to the next phase.

**Definition Phase.** Once an achievable option has been identified and endorsed, project activity turns toward implementation planning. The goal of this phase is the precise determination through detailed study and analysis of the resources required to achieve the project objectives. Principle activities include risk reduction, detailed costing, and scheduling, and the development of the implementation concept and plan. It is during this phase that potential suppliers are solicited to provide an indication of interest in responding to a subsequent “*request for proposal*” (RFP). The RFP would have as a fundamental underpinning the finalized SOR, whose refinement would have been ongoing throughout the past phases. If the project is a complex one, the RFP could be issued during this phase to assist in the definition of project costs. Equally as well, leadership for a complex project may shift from the sponsoring organization to the implementing organization during this stage. Like the previous phases, the end of this phase is marked by the submission and approval of a synopsis sheet, in this case the *synopsis sheet (effective project approval)* (SS(EPA)). Acceptance of the SS(EPA) provides approval for the selected option, agreement with the cost estimates, agreement to proceed to the implementation phase, and approval for the expenditure of the required resources.

**Implementation Phase.** With the SS(EPA), no additional senior management approval is required unless a significant departure from the approved parameters is necessary. Activities in this phase concentrate on the finalization and detailed execution of the project implementation plan. It is during this phase that the RFP is issued to industry. If it has not been done in the previous phase, the contractor is selected and the contract negotiated.

## The Research Methodology

An investigative probe, based mainly on the activity-stage Innovation Model of Kumar *et al.* (1994) and stage-gate process based macro model of DND Acquisition Process as shown in Figure 2, was developed to conduct a case study of the NPD project management for a complex defence system. The two models were used to portray the NPD decision process but in somewhat different contexts. The Macro Model of DND Acquisition Process is the formal model supposed to be adopted for developing (or acquiring) any major system by the Canadian Department of National Defence. As mentioned in the previous section, the adoption of technology within the Canadian Forces is primarily accomplished under the auspices of a capital project. The innovation model of Kumar *et al.* (1994) is based on their study of the Canadian electronic and telecommunication industry from the producer's perspective. The electronic and telecommunication industry segment is traditionally high tech and uses "dual-use" technology that has both military and commercial applications (Alic *et. al.*, 1992; Howe Jr. and Blanchard, 1992). This model captures the fundamental concept of market acceptance of high technology and dual-use products and is most appropriate to represent the NPD project management in DND.

The case study was selected as the most appropriate method in line with the suggestions made by Yin (1994) to understand a contemporary phenomenon especially when the boundaries between the phenomenon and context are not clearly evident, the situation in which there will be more variables of interest than data points and relies on multiple sources of evidence such as the case of the NPD project management. However, the case study methodology lacks rigor and provides little basis for scientific generalization (Yin, 1994). Despite these weaknesses, we felt that the case study methodology seemed to be the most appropriate in this study to explore the dynamics of the combination of NPD and technology acquisition approaches as richer data and descriptions were needed to understand the NPD project management involving complex product systems from the perspective of a Defence Organization.

The case study was conducted in the Canadian Department of National Defence and involved in-depth study of official manuals, procedures, and information available within the public domain, and interview of three key personnel (at the rank of project manager and above) directly involved with or responsible for this complex product. A set of questions was prepared focusing on the research problem (the role of project management in NPD process) that we were interested in investigating. Both personal interviews as well as telephonic interviews methods were adopted as suggested by Davis (1999). Written notes of these interviews were kept and at the same time were tape-recorded as a back-up measure. The respondents were asked to describe the activities within each stage of the NPD process, the role of different stakeholders in the development process, issues involved at different stages and how they were resolved, the role of the organizational culture of DND and its stakeholders, management of the process and mechanism to co-ordinate and monitor etc. The insight gained from this is compared with the priori models, activity-stage innovation model of Kumar *et al.* and stage-gate process based Macro Model of DND Acquisition Process to find out why the deviation took place and based on this a modified framework is proposed.

## The Case Study

### The Story of Coyote

This case study deals with the development of a military reconnaissance vehicle for the Canadian Forces to replace an older tracked vehicle (Lynx) that was in the process of being de-commissioned. The new vehicle was called the Light Armored Vehicle (LAV-2) and was more popularly known as the "*Coyote*" (depicted in Figure 2 below). The Coyote is an 8-wheel reconnaissance vehicle capable of carrying 4 crew members (driver, commander, gunner, and surveillance operator). It is equipped with a sophisticated surveillance system (visible spectrum

day camera, thermal imager night camera, ground surveillance radar, and a laser range finder). For combat purposes, the vehicle is well armed with a weapon system consisting of one 25-mm chain gun with coaxial 7.62-mm machine gun on a two-man electric drive turret. The vehicles were scheduled to start being delivered in mid 1995. A budget of \$ 883.7M CDN was allotted to develop the Coyote from concept to induction of 229 of these vehicles. A vehicle such as the Coyote can only be manufactured by a handful of companies and since there was only one company in Canada that was capable, the selection of the Diesel Division of General Motors (DDGM) as the prime contractor was a formality. In July 1992, a model contract package was sent to DDGM upon which they were to base their proposal for the vehicle. DDGM realized that they would need to contract some elements of the design to other qualified sub-contractors and in Sept 1992, they selected Computing Devices of Canada (CDC) to be responsible for the design and development of the surveillance system. DDGM also selected Delco, an American company, to be responsible for the turret and telescopic mast design.



**Figure 2: Coyote with all sub-systems**

The Program Control Board approved the program-planning proposal in October of 1992 and the Treasury Board gave their effective approval in December of that year. Even though the contract for the vehicle had been awarded in March 1993, the government and the contractor were still working out contract details and amendments and it was only in January 1994 that contract activities formally commenced. Production of vehicles started in early 1996 and the first deliveries took place in March 1996. The delivery of the vehicles continued until March 1998 when the last vehicle rolled off the production line. The project is anticipated to close out in March 2003.

### **Deviations from Macro Model of DND Acquisition Process**

The DND Acquisition Process described earlier in this document spoke of a highly formalized stage gate process with four clear phases and accompanying gates that NPD projects of this nature are supposed to follow. Evidence collected from personal interviews indicated that there was a keen desire to keep the development of the project within Canada. Projects of this magnitude usually take many years to work its way through the formal 4-stage process. In retrospect, the Coyote project was “fast tracked” and went from concept to product delivery in less than three years. The budget of \$ 883.7M CDN was allotted to develop the Coyote from concept to induction of 229 of these vehicles. However, the final number of vehicles delivered to the Crown was 203 due to a contract amendment initiated by the Canadian Armed Forces. The positive aspects were that once the budget was assigned, the military was able to spend it without any undue political interference.

## Role of stakeholders

It appears from the interview of the respondents that the army never actually got to pick the vehicle they really wanted. The army would have preferred to get the MRCV (Multi-Role Combat Vehicle) but since this was clearly not likely, they adopted a compromise strategy where they made the most of the circumstances and picked the best possible second solution. The vehicle was initially chosen to be similar to the LAV-25 (used by the U.S. Marine Corps). However, the LAV-25 turned out to be unsuitable and the need for a unique design became apparent. The Coyote design was a natural and necessary evolution. With respect to the contractor selection, DDGM was the only likely Canadian candidate with the resources to field this project so it could almost be considered a sole-sourced contract – very unusual for a project of this magnitude. There were some other international companies (Thyssen from Germany, Cadillac Gage from USA, UDPL etc.) that also had the ability to supply the vehicle but it appears that they were not in the race. It appears that DDGM was always the incumbent because of the industrial benefit clause that protects the interests of Canadian companies.

## Issues and solutions

Products designed for military applications are sometimes quite different from products that are commercial successes. Military applications are special because traditional business planning (where the objective is profit) is not the guiding motivation. The fielding of the Coyote project was successful in great part due to the nature of the personnel involved in its execution. The evidence that we have collected points to an outstanding amount of dedication, personal investment of time and sacrifice that key project personnel put in to bring it to a successful conclusion. The shrinking defence budgets often means working with less personnel and resources than would be considered optimal.

At the design stage, it became apparent that DDGM and its sub-contractors were unable to define technical parameters of the various sub-systems as well as the complete system that should be acceptable to the technical and operation experts in the Coyote project team (DND team responsible for the development of Coyote). This shortcoming could be attributed to an inadequate understanding of the concept behind the technical requirements that stems from the operational requirements. This was a major impediment to the development of the system. The formal process and procedure of DND relies on contract administration and legal obligation. However, contract administration and legal obligations were not a solution to overcome the design problems to deliver the desired systems for the Coyote. Instead of deciding on the legal option at the end of the contractual period, the Coyote project team opted for a collaborative approach by inviting the DDGM team (contractor) and Delco team (sub-contractor) to take part in the training and field exercises with the soldiers for whom they were designing the vehicle. This helped the developers to better understand the operational requirements as well as the needs of soldiers. This helped the DDGM team immensely and they were able to design a better vehicle. The participation of the DDGM team in simulation exercises forged strong personal relationships between the key personnel on either side to create a virtual team consisting of key personnel from the Coyote project team, the DDGM team (contractor), and their sub-contractors (Delco, CDC etc.) that proved crucial to the successful development of the Coyote and its sub-systems. Team members worked together as a virtual *Integrated Product Team* and this resulted in reduced development time, cost, effort, risks and uncertainties compared to similar armored vehicle development program undertaken by the armed forces of other countries. Further support for the IPT approach is evident from the fact that the DDGM had no objection to allow the Coyote project team to work directly with its sub-contractors such as Delco or CDC (contrary to the procedures of contract). The common objective behind the development of the Coyote was based on a win-win strategy and the positive, collaborative approach adopted by the Coyote project team caused the development of the project to move a lot faster, resulted in better communication and developed high levels of trust among all stakeholders: DND, DDGM and DDGM's sub-contractors.

Frequently, the good reputation of the contractor itself was used as a great source of leverage to coerce them into coming up with creative solutions to apparently insurmountable problems. Delco spent an additional \$1M CDN outside of their contractual obligation to debug the false alarm encountered in the Laser warning receiver (LWR), caused through a combination of sunlight on the sensor and the resulting vibrations from the cannons firing. Since the market for the Coyote is very small, limited to Canada and its allies, it is essential that DDGM be able to sell the product to these other customers in the future. The recommendations and good referrals from DND helps DDGM to clinch similar product development projects from Allied forces. The camaraderie and informal relationships that are enjoyed between the Canadian soldiers and their allied counterparts often results in good public relations and advertising for DDGM.

Some other issues that were linked to the development of the Coyote are discussed below.

**Technology Transfer.** At every stage of the product development project starting from design to delivery of Coyote, the DDGM has the contractual obligation to transfer the technological knowledge to the DND as it had the ownership right over the technical data and design. Also, at the induction phase of the NPD project, DDGM has to pass the technical knowledge to enable DND to maintain the vehicles properly. Original equipment manufacturers (OEMs) were tasked with providing training to qualified DND instructors who in turn transferred it over to personnel on the client side.

**Organizational Cultural issues.** The defence establishment is somewhat unique in the sense that two sub-cultures operate simultaneously and intimately on a particular NPD project and they tend to approach the project from two philosophically different perspectives. The interests of the soldier are represented by the “*Operators*” a group responsible for ensuring that the Department gets the best product with the most superior capabilities from an operational perspective. The technical, contractual and fiduciary interests of the Department are administered by the “*Engineers*” a group that ensures that the contract is properly administered from a technical performance and contractual perspective. This apparent dichotomy is designed to be self-regulating so that the best product is eventually produced at the optimal cost. Another interesting observation is the nature in which power and control is shared on a project of this magnitude. The Project Director represents the interests of the “Operator culture” and would typically hold the rank of at least a Lieutenant Colonel. The Project Manager is from the “Engineer culture” and would most likely hold the rank of at least a full Colonel.

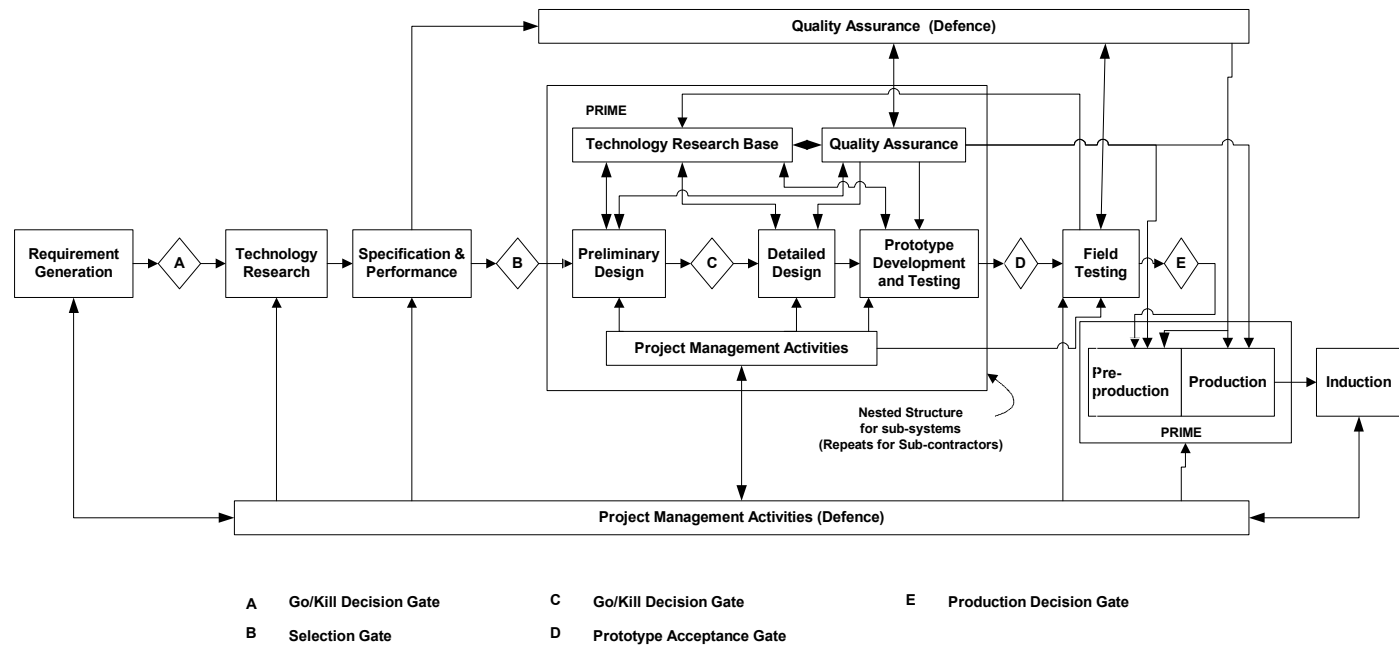
**Problems with the Fielding of the Coyote LAV-2.** At the end of this project, a formal post mortem review was written and several issues were identified as being problematic during the fielding or deployment of the Coyote. The report highlighted the issues and then made recommendations as to how this project could have been better executed and how these mistakes could be avoided in the future. Key areas to improve future project management efforts of complex product development include the need for a better conceptual doctrine, development of Training Needs Analysis (TNA) and support, logistical support and development of tactics, techniques and procedures.

### **Proposed Framework for Complex Product Development Management**

The development of the Coyote gives an insight into how defence services handles the NPD project management of such large and complex systems. The respondent view gives a picture of this project that is markedly different from the processes and procedures defined in the official manual. The actual process is largely informal and follows methodology not defined in any of the procedure manuals. In reality, it conceptually encompasses the spirit if not the letter of the formal process and extends it beyond the prescribed boundary.

The “Identification Phase”, as described in the earlier section on the DND acquisition process, identifies the requirement in terms of capability deficiency and potential solutions to deficiency in broad terms, similar to the idea generation stage (Cooper, 1990). At the end of the “Identification Phase”, the project goes through departmental scrutiny for further refinement of the proposed requirements and potential solutions. The “Option Analysis Phase” is the next phase where the PPRA document is prepared. Only at this stage is the new defence system such as the Coyote, or weapon system broadly defined. The logical end of the “Identification Phase” and “Option Analysis Phase” takes place only when requirement of the new product is firmed up. Logically, therefore, these two phases together to form the “Requirement Generation” stage in our proposed framework as depicted in Figure 3. The “Idea Generation” stage of the NPD process for commercial products consists of multiple ideas for some potential products whose concept has evolved from market research. The “Requirement Generation” stage in the case of defence, on the other hand, evolves from the void in military capability.

At the end of the “Requirement Generation” stage, the SS(PPA) is submitted for approval. This is a “Go/Kill” decision point. Approval of the SS(PPA) at this point provides expenditure authority for the resources necessary for the project to proceed to the next phase. The approval of the project also initiates the formation of a formal multidisciplinary cross-functional project team for the NPD, similar to IPD in concept. From this point onwards, the new product development activities are managed as a project shown as “Project Management activities (defence)” in the framework. The arrows indicate how the project management activities influence or are influenced by different stages of the NPD process. The way the project management activities of the defence services influence other stages is shown by appropriate links.



**Figure 3: Proposed NPD Project Framework for Complex Defence Products**

The “Definition Phase” and “Implementation Phase” in the DND acquisition process corresponds to “Technology Research” stage and “Specification & Performance” stage in our proposed model. There is no one to one correspondence between the phases described in the DND acquisition process and the proposed process. However, they are related to these stages conceptually. Once the Coyote project was approved (as seen in this case), the project team looks for basic technology, which can be embedded within the product to be developed that can fulfill the technological capability being sought. This stage is defined in our model as the “Technology Research” stage. Once the search for appropriate technology is over, the project team frames the technical specification of the system and sub-systems and the performance criteria, which is termed as “Specification & Performance” stage. In practice, these two stages are not totally sequential, in the sense that development of specification & performance activities may be started while the technology search is in progress. However, they are sequential in the sense that the specification of the total system or sub-system cannot be finalized unless the basic technology search is over with finalization of a definite technology for that sub-system or complete system. This indicates the functional relationship between these two stages. Once the specification and performance criteria of the new product are developed, it acts as the input to formulate the quality assurance measures. This is shown in the framework as a unidirectional link joining “Specification & Performance” stage to “Quality Assurance (defence)”. The end of the “Specification and Performance” stage culminates in the issuance of the RFP document to potential suppliers. The gate that follows this stage is the “Selection Gate”, where the decision to choose the best firm to design and develop the product is taken in line with the DND’s technology acquisition strategy. The next few stages (from preliminary design to prototype development and testing) shown within the framework are outsourced from “primes” like DDGM and its sub-contractors like CDC and Delco. These processes take place in the domain of the prime and sub-contractors within the overall control of defence services. For the sake of clarity, the framework shows the process only within the domain of the “prime”.

The stage succeeding the selection gate is the “Preliminary Design Stage”. During this stage the prime develops preliminary design of the product. This stage is characterized by intensive search of appropriate technology within the firm’s internal technology knowledge base. If appropriate technology is not available within the firm, then the firm initiates a search of the technology from external sources or develops the technology internally subject to constraints of the resources allotted for this product development such as time, funds, and manpower. All three methods of technology sourcing such as internal, external and development of new technology, were observed for Coyote. This is shown as “Technology Research Base” in the framework. The “Technology Research Base” not only provides the research knowledge base to “Preliminary Design” stage to develop preliminary design, but also enriches itself by accumulating the alternate concepts developed during preliminary product design for further refinement. Consequently, it can be used at a later stage in the NPD process or in some other NPD process. This is shown in the form of the bi-directional arrow connecting the “Technology Research Base” and “Preliminary Design” stage. This stage is significantly influenced by the technology acquisition policy of DND. The receipt of RFP initiates the formation of a formal, multidisciplinary, cross-functional project team at the prime end to manage all activities associated with design, development, and production of the new product. This is shown as “Project Management activities” within the dotted box. The project management activities of the prime draw their reference from the overall project management activities of defence services presented as “Project Management Activities (Defence)” in the framework. Also, they provide the status of their activities to the project management group in defence services, which helps in updating of status and refinement of the overall project activities of defence services. This in turn modifies the activities to be carried out at the prime’s end. Thus, a continuous process of bi-directional information flow takes place between these two project management groups. The way that the project management activities of the prime influence other stages within the prime’s domain or defence services domain is shown by appropriate links.

The “Preliminary Design” stage also initiates the developing of “Quality Assurance” measures at the prime’s end for the new product. The quality assurance programs of the prime draw its reference from the overall quality assurance programs of defence services presented as “Quality Assurance (Defence)” in the framework. A bi-directional link between these two provides a smooth path for flows of information in case there is a change to the quality assurance measures adopted by any one of them. This is required to meet the overall performance requirement of the new product. The gate, succeeding the preliminary design stage, is a decision point where the acceptability of the preliminary design is reviewed. If the preliminary design meets all the design and performance criteria of that stage, then it sails smoothly to the next “Detailed Design Stage”; otherwise an alternate preliminary design of the product is initiated. In the detailed design stage, the preliminary design concepts are further expanded to the component level. At this stage, the prime and its sub-contractors use advanced design and manufacturing concepts such as CAD/CAE, concurrent engineering, and manufacturing resource planning to decrease the product development time and to achieve smooth transition from product design to production. Specification sheets, Bill of Material (BOM), and fabrication drawings are prepared at this stage.

The next stage is the “Prototype Development & Testing” stage, where a physical working model of the product is developed and tested. Any defect in the product is detected and rectified at this stage. A similar process is followed for the sub-systems such as the surveillance system, turret/telescopic mast and laser warning receiver (LWR) that are developed by sub-contractors. Even though these are sub-systems to Coyote, they are independent systems in their own rights. For simplicity of representation, we have focused on the activity of the prime in the framework. The activity of the sub-contractors is identical to that of the prime and depicted as a series of nested boxes in the framework. The gate that follows this stage is the “Prototype Acceptance Gate”. At this point transition from prime domain to defence services domain takes place. The prototype is evaluated by the defence services. If the prototype is accepted then it enters the “Field Testing” stage. At this stage, the prototype is subjected to extensive field-testing. The field-testing has two objectives: 1) to evaluate the product performance under actual operating conditions, detect and rectify shortcomings and 2) analyze the performance and modify the product if required to enhance performance. The gate that follows this stage is the “Production Decision Gate”. If the prototype performs satisfactorily during the field-testing then the prime gets the green light for the production of the system. The production process consists of two stages: Pre-production Stage (gear up the production line for the new system production such as retooling the production line and sourcing of raw material and components) and Production Stage (mass production of the new product). The stage succeeding the “Production” stage is the “Induction” stage. It is characterized by physical delivery of the new product from DDGM to DND and includes integrated hardware embedded with process and associated knowledge in the form of training, technology transfer and documentation. For simplicity, the framework only depicts one level of outsourcing of design, development, and production capabilities (i.e. the prime). In turn if the prime such as DDGM outsources a part of the design, development and/or production process to other sub-contractors’ firms (e.g. CDC and Delco for surveillance system and turret/telescopic mast respectively) then appropriate stages will be nested in the stages shown within the dotted boxes.

## **Conclusion**

This paper examines the NPD project using the case study approach for a complex product development from the perspective of the Canadian Defence organization. Based on this study, a conceptual framework is proposed. The case of Coyote is a good example how DND effectively uses project management techniques to integrate their internal sources with external sources of innovation in developing technologically complex systems. The NPD process for commercial products is distinctly different from the NPD process for defence products. The major

difference stems from the fact that the defence service exercises far more control over the NPD process than would be likely in a traditional commercial product development due to the nature of the defence products and the rigid DND performance criteria. However, the managers responsible for complex product system development in commercial sectors such as aircraft, chemical process plants and electricity network control systems can use the proposed framework to manage outsourcing of technology as well as manufacturing capabilities and integrate them effectively to their internal capabilities. Also, managers of small firms with limited resources can use this framework. For example, proprietary semiconductor chips, a technologically complex commercial product, require a high level of design, systems engineering and manufacturing capability. Small electronics firms operating in a niche market segment with limited resources usually do not possess such capabilities and usually seek to outsource them. The managers of such firms can use this framework to effectively manage their NPD processes. It must be noted that this is an exploratory study conducted in the defence environment. Further study in a commercial environment may be necessary to refine the framework or to develop a modified framework suitable for NPD process of complex systems in general.

### **References**

Alic, J. A., Branscomb, L. M., Brooks, H., Carter, A.B., Epstein, G., Beyond spin-off, Harvard Business School Press, Boston, 1992.

Briggs, Charles, and Kleiner, Brian H., “Managing Human Behaviour in the Federal Government: The promise of Integrated Product Teams in Managing Major System Acquisitions”, Management Research News, Volume 25, Number 3, 2002, 21-27.

Cicmil, Svetlana J.K., “Perspectives Critical factors of effective project management”, The TQM Magazine, Vol. 9, No. 6, 1997, 390-396.

Cooper, Robert G., “Stage-Gate Systems: A New Tool for Managing New Products”, Business Horizons, May-June, 1990, 43-54.

Cooper, Robert G., “PERSPECTIVE: Third-Generation New Product Processes”, Journal of Innovation Management, 11, 1994, 3-14.

Davis, Duane, Business Research for Decision Making, Duxbury Thomson Learning, Boston, fifth edition, 1999, 263-318.

Department of National Defence, DND Acquisition Reform Guide, Ottawa, Ontario: Directorate Business Change Management, 1999.

Department of National Defence, Defence Management System Manual (A-AD-125-000/FP-001), Ottawa, Ontario: Queen’s Printer, 1998.

Durrani, Tariq S., Forbes, Sheila M., and Broadfoot, Charles, “An integrated approach to technology acquisition management”, International Journal of Technology Management, Vol. 17, No. 6, 1999, 597-617.

Graham, Gary, and Ahmed, Pervaiz, “Buyer-supplier management in the aerospace value chain”, Integrated Manufacturing Systems, 11/7, 2000, 462-468.

Hobday, Mike, and Rush, Howard, “Technology management in complex product systems (CoPS) – ten questions answered”, International Journal of Technology Management, Vol. 17, No. 6, 1999, 619-638.

Hollington, Jack, "Unmanned vehicles go to war", *Industrial Robot*, Volume 25, Number 6, 1998, 379-383.

Howe, Jr., Harlan, Christine Blanchard, "Dual-Use Technologies: Defence Technology Conversion, Reinvestment and Transition", *Microwave Journal*, July, 1992, 24-34.

Kline, Stephen J., and Rosenberg, Nathan, "An Overview of the Innovation" in *The Positive Sum Strategy: Harnessing Technology for Economic Growth*, National Academy of Sciences Press, 1986, 275-305.

Kumar, Vinod, Mathur, Sandeep and Kumar, Uma, "An overview of the innovation Process in the Canadian electronic and telecommunication (E&T) industry", *Engineering Management Journal*, Vol. 6, No. 3, 1994, 23-30.

Schilling, Melissa A., and Hill, Charles W. L., "Managing the new product development process: Strategic imperatives", *Academy of Management Executive*, Vol. 12, No. 3, 1998, 67-81.

Valdez, Ralph, and Kleiner, Brian H., "How to build teamwork in the defence industry", *Team Performance Management: An International Journal*, Vol. 2, No. 2, 1996, 41-48.

Yin, Robert K., *Case Study Research Design and Methods*, Sage Publications, USA, Second edition, 1994.

## **DETERMINANTS OF THE DIFFUSION OF CROSS-FUNCTIONAL NEW PRODUCT DEVELOPMENT TEAMS**

This research develops a model of those factors influencing the diffusion of cross-functional new product development teams in organizations. Data from 57 new product development managers indicate that a supportive organizational climate, NPD complexity, quality of departmental communication, organizational size, and management and employee support all influence the diffusion of such teams in organizations.

### **Introduction**

Cross-functional teams are “fundamental forms for promoting integration” (Swink, Sandvig, and Mabert, 1996). It is therefore not surprising that a cross-functional new product development (NPD) team is one of the most widely cited practices for achieving successful new product development. A cross-functional NPD team is a team comprised of members representing the functional areas most involved in the NPD effort, such as design, R&D, engineering, manufacturing, and marketing. In addition to internal representation, this team may also include representatives from key suppliers and customers.

A variety of studies have examined the benefits of using cross-functional teams when developing new products. Droge, Jayaram, and Vickery (2000), for example, in a study of 57 automotive parts and sub assembly suppliers, found that cross-functional NPD teams are positively associated with the ability to minimize new product development time and new product introduction time. McDonough III (2000), in a study of 112 Product Development and Management Association (PDMA) members, found cross-functional NPD teams to be positively associated with project performance, measured by the extent that new products were brought to market quicker, budgets for developing new products were met, the quality of the products was high, and members of the team were satisfied.

Gerwin and Barrowman (2002), in a meta-analysis of the research on Integrated Product Development (i.e., an approach for improving NPD performance where major NPD activities, such as product design and manufacturing process development, occur concurrently in an integrated fashion using a cross-functional team) characteristics and NPD performance, found that cross-functional NPD teams reduce development time but not goal failure. Gerwin and Barrowman (2002) highlight that one possible reason for this negative relationship is that management may set stricter NPD goals in exchange for the required resources to enable cross-functional NPD teams to occur.

It appears that organizations are responding to the many benefits of using cross-functional NPD teams when developing new products. Trygg (1993), for example, in a survey of 109 Swedish machinery and metalworking organizations, found that over 80% of these organizations used cross-functional NPD teams in their development efforts. Griffin (1997)

highlights a 1994 study of 193 organizations by Mercer Management Consultant, Inc., which found that cross-functional NPD teams are used in 78% of high performing (i.e., top 1/3 in combined innovativeness, success rate, cycle time, and revenue contribution) and 66% of lower-performing organizations. McDonough III (2000), surveying 112 PDMA members, found that 97% of the organizations surveyed have used cross-functional NPD teams and that cross-functional NPD teams are always used in 33% of these organizations.

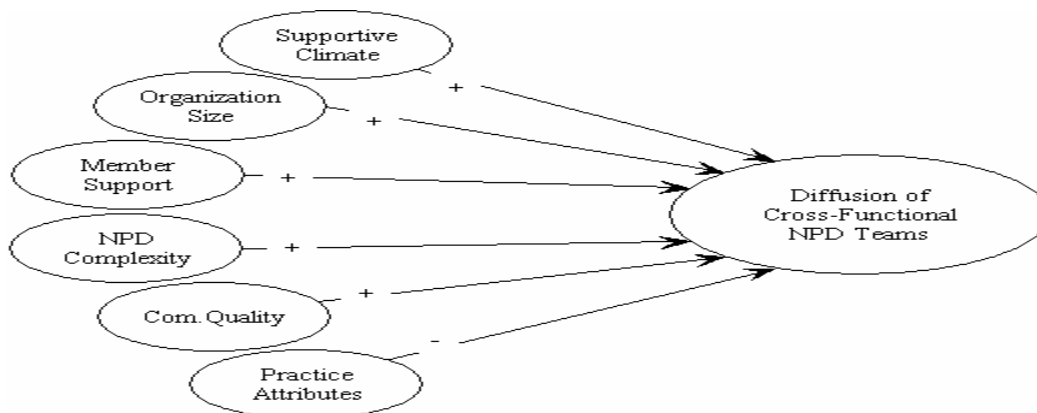
Griffin (1997), in a PDMA sponsored study of NPD best practices spanning multiple industries and products, highlights that over 84% of all new-to-the-world, new-to-the-firm, and major revision NPD projects use cross-functional NPD teams, an increase from 76% based on results from a similar PDMA study conducted in the early 1990s. For less innovating projects, such as incremental improvement, repositioning, and cost reduction projects, Griffin (1997) found that cross-functional NPD teams are used only 45% of the time. Comparing the best organizations<sup>2</sup> to the remaining ones, Griffin (1997) concludes that best organizations “use multi-functional teams in the majority of all NPD projects, regardless of the level of innovativeness”.

Given the large amount of research on the benefits of cross-functional NPD teams and the fact that many organizations still do not use cross-functional teams on 100% of their NPD projects, it is surprising that very little research has occurred on why some organizations use cross-functional teams on all projects, while others use cross-functional teams on only key high risk projects or not at all. This research develops a model of those factors influencing the diffusion of cross-functional teams, captured by the percentage of NPD projects undertaken by the organization that use such teams.

### Cross-Functional NPD Team Diffusion

A review of the innovation and NPD literature indicates that there are many possible factors that may influence the diffusion of cross-functional NPD teams in organizations. This research examines organizational factors and not those specific to any one NPD project. This research examines how organizational climate, organization size, member support, NPD complexity, quality of departmental communication, and practice attributes impact the diffusion of cross-functional NPD teams in organizations. A model outlining this relationship is illustrated in Figure 1.

**Figure 1: Proposed Research Model**



<sup>2</sup> *Best organizations* are those who are i.) either the most successful based on a set of performance criteria or in the top third of their industry, and ii.) above the mean on the relative success and market-financial success for the entire sample of 383 organizations. Based on these criteria, the *best organizations* represent 85 companies or 22.2% of the sample.

This research proposes that the climate of the organization will influence the extent of diffusion of cross-functional NPD teams. It is expected that cross-functional NPD teams will be easier to implement and maintain in those organizations where blurring of job boundaries and open and incremental communication and information sharing already exists. Such a climate is defined for this research as a *supportive organizational climate*. Adapting research by Wallach (1983), a supportive organizational climate is captured by the extent that the organization is receptive to change, risk taking and bureaucratic (i.e., which will be reversed coded) and supports openness in decision making, and collaboration. The relationship between organizational climate and the extent of cross-functional NPD team diffusion is stated as follows:

- H<sub>1</sub>: A supportive organizational climate will positively influence the diffusion of cross-functional NPD teams.

Frambach and Schillewaert (2002) highlight that the size of the organization “has repeatedly been found to influence the propensity to adopt”. However, the direction of this relationship is debated in the research literature. Justification for a positive relationship between organizational size and innovation diffusion includes larger organizations adopt technological innovations faster due to their greater financial resources and technical expertise (Meyers, Sivakumar, and Nakata, 1999) and “feel a greater need to adopt innovations in order to support and improve their performance” (Frambach and Schillewaert, 2002). On the other hand, Meyers *et al.* (1999) cite studies that have found a negative relationship between organizational size and innovation diffusion, suggesting that the flexibility and quick decision making capabilities of smaller organizations enables them to quickly implement new innovations.

The research proposes that *organizational size* will positively influence the diffusion of cross-functional NPD teams. It is expected that larger organizations will have diffused cross-functional NPD teams to a greater extent than smaller organizations. The reasoning is twofold. First, cross-functional NPD teams may require large financial investments. As larger organizations have access to greater financial resources, they will be better equip to support the full and extended use of cross-functional NPD teams. Second, in a smaller organization, due to the lower number of employees and greater chance of interaction between them, extensive informal communication and coordination may already exist between functional areas; reducing the need for cross-functional NPD teams.

- H<sub>2</sub>: Organization size will positively influence the diffusion of cross-functional NPD teams.

*Member support* measures the extent that various members of the organization support the ongoing use of cross-functional NPD teams. It is expected that organizational support will positively influence the extent of diffusion of cross-functional NPD teams, as cross-functional NPD teams will be easier to implement when members of the various functional areas are more willing to work together and/or the use of cross-functional NPD teams is supported by senior members of the organization. This research captures member support by senior manager, department manager, and employee support for cross-functional NPD teams.

- H<sub>3</sub>: Member support will positively influence the diffusion of cross-functional NPD teams.

*NPD complexity* measures the complexity of the NPD activities of the organization. As the complexity of NPD activities increase, it is expected that NPD practices, such as cross-functional teams, will be needed to combat the uncertainty resulting from this complexity. The measurements used to capture NPD complexity represent a modification of the project complexity indicators developed by Barclay and Dann (2000) and include the average number of working person days on projects, number of disciplines involved in NPD projects, number of functions involved in developing products in the organization, number of design personnel

involved in developing products in the organization, and the number of people external to the organization involved in developing new products.

- H<sub>4</sub>: NPD complexity will positively influence the diffusion of cross-functional NPD teams.

*Communication quality* focuses on how well cross-functional NPD teams, if they exist in the organization, are being used. Communication quality therefore represents the ability of such teams to perform their intended purpose, which is to improve the communication and integration between the various functional areas involved in developing new products. If the organization is successful at using cross-functional NPD teams on a limited number of NPD projects (e.g., improvement in communication and coordination between the functional areas when developing new products) they may be motivated to use such teams more often. As a result, this research expects that communication quality will positively influence the diffusion of cross-functional teams in organizations.

Hoegl and Gemuenden (2001), after interviewing 575 team members, team leaders, and managers representing 145 software development teams, found that teamwork quality can be captured through six constructs, labeled: communication, coordination, balance of member contribution, mutual support, effort, and cohesion. Adapting Hoegl and Gemuenden's (2001) work, communication quality is captured by the frequency of communication between the functional areas involved in NPD, extent of open communication between the functional areas involved in NPD, the extent that the NPD goals are understood by the functional areas involved in NPD, the coordination between the functional areas involved in NPD, amount the functional areas support one another when developing new products, the ability of the functional areas to reach consensus regarding important NPD issues, the extent by which NPD is viewed as a priority by the functional areas involved in NPD, and the extent that functional areas are involved in NPD activities.

- H<sub>5</sub>: Communication quality will positively influence the diffusion of cross-functional NPD teams.

The innovation literature suggests that the attributes of an innovation will influence its diffusion. Meyers and Goes (1988), for example, found medical innovations that are highly observable, carried low risks, and required relatively little skill (i.e., all attributes of the innovation) are more readily diffused versus other medical innovations. Similarly, Wolfe (1994) suggests that rates and patterns of diffusion are influenced by the attributes of the innovation, emphasizing that "the organizational determinants of the adoption of an innovation differ as the characteristics of the innovation differ". It is expected that the *attributes of cross-functional teams* will influence its diffusion in organizations. The attributes examined by this research are complexity, ongoing financial cost, and risk.

One of the more widely cited attributes of an innovation is *complexity*. For this research, complexity is defined as the extent to which a practice is perceived as relatively difficult to understand and use. Rogers (1983) suggests that the complexity of an innovation is negatively related with its rate of diffusion. Meyer and Goes (1988) found that the skill required to use a medical innovation is negatively associated with its diffusion. Tornatzky and Klein (1982), examining thirteen studies of complexity, found that all but one showed a significant negative relationship between innovation complexity and adoption. This research, following Rogers (1983), Meyers and Goes (1988), and Tornatzky and Klein (1982), expects that the complexity of using cross-functional NPD teams will negatively influence its diffusion.

In addition to complexity, *practice cost* is also a widely cited innovation attribute. Although, the conceptual innovation literature suggests that the cost of an innovation negatively influences its diffusion, only limited empirical support exists (Tornatzky and Klein, 1982). One

of the major disadvantages cited for NPD formal methods, such as Quality Function Deployment and Design for Manufacture, and a reason for low consistent usage is the cost of using such methods (Trygg, 1993). The cost of constantly using cross-functional NPD teams may be so great that their usage may be limited to critical development projects. This research therefore expects that the ongoing cost of cross-functional NPD teams will negatively influence its diffusion.

The innovation literature highlights that the *risk* of using an innovation negatively influences its diffusion. For example, Meyer and Goes (1988) found risk negatively influences the diffusion of medical innovations. Similarly, this research expects that the risk of using cross-functional teams will negatively influence its diffusion in organizations.

- H<sub>6</sub>: Cross-functional team attributes (i.e., complexity, cost, and risk) will negatively influence the diffusion of cross-functional NPD teams.
- 

### **Research Method and Data Analysis**

This research examines the entire organization's NPD effort and not individual projects. As a result, the unit of analysis for this research is the organization. The sampling frame comprises of Managers of Product Development from US manufacturing organizations operating in industries where the use of cross-functional NPD teams is likely. The industries selected for this study are represented by North American Industry Classification System (NAICS) Codes 333 (i.e., Machinery Manufacturing), 334 (i.e., Computer and Electronic Product Manufacturing), 335 (i.e., Electrical Equipment, Appliance, and Component Manufacturing), and 336 (i.e., Transportation Equipment Manufacturing). During October and November 2002, 490 Managers of Product Development from these industries were mailed a questionnaire kit. Each kit contained a cover letter, questionnaire, and self-addressed stamped return enveloped.

Results of pre-testing indicated that the questionnaire would be difficult to answer for managers from very large organizations, as NPD managers would need to answer questions regarding their entire NPD effort and not individual projects. As a result, only those companies with between 50 and 1000 employees were selected for participation. Of the 490 questionnaires mailed, 57 usable questionnaires were return for a response rate of approximately 11%.

Due to the simplicity of the model, multiple linear regression analysis was chosen as the statistical technique to analyze the data. Before performing regression analysis, tests of internal consistency and collinearity occurred to ensure the consistency of constructs and stability of the research model. Running multiple regression with backwards elimination, the following SPSS output is produced.

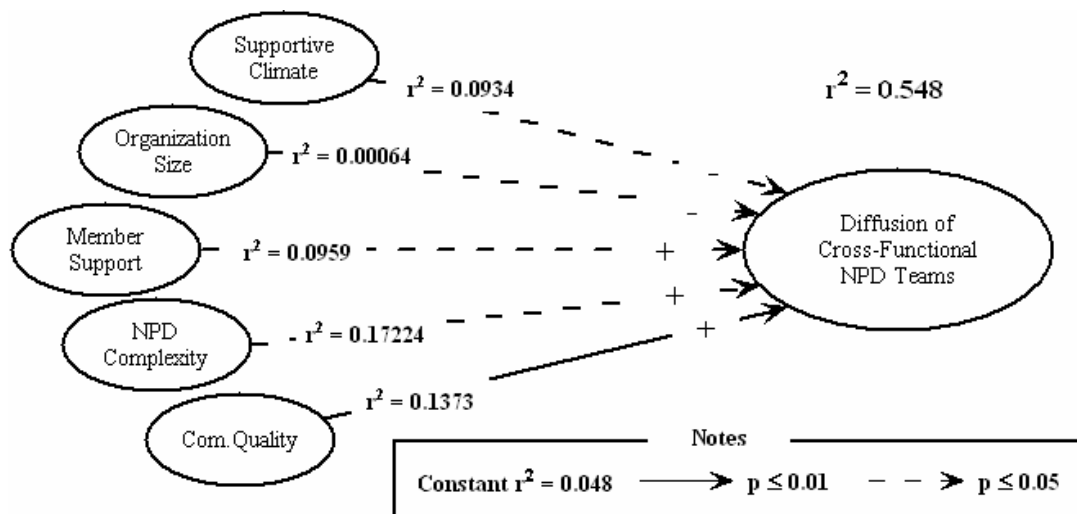
**Table 1: Summary of SPSS Output**Coefficients<sup>a</sup>

| Model |            | Unstandardized Coefficients |            | Standardized Coefficients | t      | Sig. |
|-------|------------|-----------------------------|------------|---------------------------|--------|------|
|       |            | B                           | Std. Error | Beta                      |        |      |
| 1     | (Constant) | -2.803                      | 30.446     |                           | -.092  | .927 |
|       | ORGSIZE    | -5.71E-02                   | .027       | -.233                     | -2.113 | .040 |
|       | CULTURE    | -8.235                      | 3.827      | -.287                     | -2.151 | .037 |
|       | NPDCPLX    | 14.983                      | 6.890      | .262                      | 2.175  | .035 |
|       | COMMUN     | 12.113                      | 4.440      | .457                      | 2.728  | .009 |
|       | CFTSUPT    | 8.401                       | 3.481      | .349                      | 2.413  | .020 |
|       | CFTATTRI   | -.226                       | 2.853      | -.009                     | -.079  | .937 |
| 2     | (Constant) | -4.253                      | 24.044     |                           | -.177  | .860 |
|       | ORGSIZE    | -5.66E-02                   | .026       | -.231                     | -2.168 | .036 |
|       | CULTURE    | -8.207                      | 3.769      | -.286                     | -2.178 | .035 |
|       | NPDCPLX    | 15.132                      | 6.553      | .264                      | 2.309  | .026 |
|       | COMMUN     | 12.069                      | 4.356      | .455                      | 2.771  | .008 |
|       | CFTSUPT    | 8.425                       | 3.430      | .350                      | 2.456  | .018 |

a. Dependent Variable: PRUSECFT

### Discussion

This research proposes that the diffusion of cross-functional NPD teams in organizations is influenced by six constructs, specifically supportive organizational climate (i.e., CULTURE), organization size (i.e., ORGSIZE), member support for cross-functional NPD teams (i.e., CFTSUPT), complexity of the organization's NPD activities (i.e., NPDCPLX), quality of the communication between departments (i.e., COMMUN), and cross-functional team attributes (CFTATTRI). Analyzing the results of the regression analysis, one of the constructs (i.e., CFTATTRI) is not significant, one (i.e., COMMUN) is significant at  $p \leq 0.01$ , and four constructs (i.e., CULTURE, CFTSUPT, ORGSIZE, NPDCPLX) are significant at  $p \leq 0.05$ . However, the direction of the relationship for two of these latter constructs (i.e., CULTURE, ORGSIZE) are opposite of what was expected. The modified model is presented in Figure 2.

**Figure 2: Model of Cross-Functional NPD Team Diffusion**

Examining the model, it is apparent that NPD complexity, communication, member support, and a supportive climate all greatly influence the extent of cross-functional NPD team diffusion, explaining approximately 17.2, 13.7, 9.5, and 9.3 % of the variance, respectively. Organizational size, at less than 0.1%, only contributes marginally to explaining the extent of diffusion of cross-functional NPD teams. As a result, this construct could be removed from the model, but will remain in this study to ensure as complete a model as possible. Examining the model, Hypotheses 3 (i.e., member support), 4 (i.e., NPD complexity), and 5 (i.e., communication quality) are all supported. Hypothesis 6 (i.e., cross-functional team attributes) is not supported. For Hypothesis 1 (i.e., supportive climate), a significant relationship exists, but the direction of this relationship is opposite of what was expected. For Hypothesis 2 (organizational size), the direction of the relationship is opposite of what was expected and only a marginal relationship exists.

This research, following the innovation diffusion literature expected that the attributes of cross-functional NPD teams, capture by cost, complexity, and risk, would influence cross-functional NPD team diffusion. Results of the data analysis failed to identify a relationship between cross-functional NPD team attributes and diffusion. It appears that the risk, cost, and complexity of cross-functional NPD teams play little role in deciding how often they are used on NPD projects.

This research proposed that the climate of the organization would positively influence the extent of diffusion of cross-functional NPD teams. The reason proposed for such a relationship is that cross-functional NPD teams will be easier to implement and maintain in those organizations where blurring of job boundaries and open and incremental communication and information sharing already exists. Examining Table 1 and Figure 2, it is apparent that a significant negative relationship exists between organization climate and the extent of cross-functional NPD diffusion. One possible reason for the negative relationship is that many of the goals of cross-functional NPD teams (e.g., blurring of job boundaries open communication) will already exist in organizations with a supportive climate. As a result, actual integration, albeit informal, may already be high in supportive climates thus making it difficult to justify the benefits of using a formal NPD practice like cross-functional NPD teams. In organizations without a climate that already contains blurred of job boundaries and incremental information sharing, it is expected there will be a greater need for cross-functional NPD teams, due to the increased need for communication and coordination between the functional areas when developing new products.

This research proposed that organization size would positively influence the diffusion of cross-functional NPD teams. It was expected that larger organizations would have diffused cross-functional NPD teams to a greater extent than smaller organizations. The reasoning presented is that cross-functional NPD teams may require large financial investments, and, in smaller organizations, due to the lower number of employees and greater chance of interaction between them, extensive informal communication and coordination may already exist between functional areas

Results of the data analysis indicated that a significant negative relationship exists between organization size and the extent of diffusion of cross-functional NPD teams. As a result, smaller organizations have diffused cross-functional NPD teams to a greater extent than larger ones. Based on Meyers *et al.* (1999), one possible reason is that the flexibility and quick decision making capabilities of smaller organizations may increase the ease of implementing and maintaining cross-functional NPD teams. Although statistically significant, the amount the construct contributes to explaining cross-functional NPD team diffusion is marginal at only 0.06 % of the variance.

## **Implications, Limitations, and Future Research**

This research examines the diffusion of cross-functional NPD teams in organizations. The implications of this study are that it may help NPD managers identify those factors that promote or inhibit the full ongoing use of cross-functional NPD teams in their organizations, and for NPD managers considering using cross-functional NPD teams, this research gives these managers an indication of the potential support that will exist for such teams.

Gerwin and Barrowman (2002), in a meta-analysis of IPD and NPD performance, emphasize that more research is required in analyzing the factors influencing the diffusion of IPD in organizations. This research represents a starting point for addressing this concern by examining one very important component of IPD, specifically cross-functional NPD teams. Based on Gerwin and Barrowman's (2002) recommendation, one area of future research is to examine whether the results of this study apply to the diffusion of the other major component of IPD, specifically concurrent product development processes.

There are a number of limitations to this study. First, at  $n = 57$ , the sample size is fairly small and thus the results of this study must be approached with caution. Future research should focus on testing the research model using a larger sample size. Second, this research addressed organizations ranging from 50 – 1000 employees. The research findings should not be generalized to organizations outside of these boundaries. Future research should therefore also examine those factors influencing the extent of cross-functional NPD teams in organizations with more than 1000 employees.

## **Conclusion**

This research develops a model of those factors influencing the diffusion of cross-functional NPD teams in organizations, measured by the percentage of the organization's NPD projects that use such teams. The model proposed that organizational climate, organization size, member support, NPD complexity, quality of departmental communication, and practice attributes would all influence such diffusion.

Results of analyzing data from 57 Managers of Product Development resulted in all but one construct being significant. Results of the data analysis indicate that NPD complexity, communication quality, member support, and a supportive climate all greatly influence the extent of cross-functional NPD team diffusion, explaining approximately 17.2, 13.7, 9.5, and 9.3 % of the variance, respectively; with organizational size only contributing marginally. Future research should focus on testing the model using a larger sample size and expanding the scope of the study to include concurrent product development processes.

## **References**

- Barclay, I. and Dann, Z. (2000) "New Product Development Performance Evaluation: A Product-Complexity-Based Method", *IEE Proc.-Sci. Meas. Technol.*, 147(2), pp. 41-55.
- Droge, C., Jayaram, J., and Vickery, S. (2000) "The Ability to Minimize the Timing of New Product Development and Introduction: An Examination of Antecedent Factors in the North American Automobile Supplier Industry", *Journal of Product Innovation Management*, 17, pp. 24-40.
- Frambach, R., and Schillewaert, N. (2002) "Organizational Innovation Adoption: A Multi-level Framework of Determinants and Opportunities for Future Research", *Journal of Business Research*, 55, pp. 163-176.

- Gerwin, D., and Barrowman, N. (2002) "An Evaluation of Research on Integrated Product Development", *Management Science*, 48(7), pp. 938-953.
- Griffin, A. (1997) "PDMA Research on New Product Development Practices: Updating Trends and Benchmarking Best Practices", *Journal of Product Innovation Management*, 14, pp. 429-458.
- Hoegl, M., and Gemuenden, H. (2001) "Teamwork Quality and the Success of Innovative Projects: A Theoretical Concept and Empirical Evidence", *Organization Science*, 12(4), pp. 435-449.
- McDonough III, E. (2000) "Investigation of Factors Contributing to the Success of Cross-functional Teams", *Journal of Product Innovation Management*, 17, pp. 221-235.
- Meyer, A., and Goes, J. (1988) "Organizational Assimilation of Innovations: A Multilevel Contextual Analysis", *Academy of Management Journal*, 31(4), pp. 897-923.
- Meyers, P., Sivakumar, K., and Nakata, C. (1999) "Implementation of Industrial Process Innovations: Factors, effects, and Marketing Implications", *Journal of Product Innovation Management*, 16, pp. 295-311.
- Rogers, E. (1983) Diffusion of Innovations, Macmillan Publishing Co, Inc., London.
- Swink, M., Sandvig, C., and Mabert, V. (1996) "Customizing Concurrent Engineering Processes: Five Case Studies", *Journal of Product Innovation Management*, 13, pp. 216-228.
- Tornatzky, L., and Klein, K. (1982) "Innovation Characteristics and Innovation Adoption-Implementation: A Meta-Analysis of Findings", *IEEE Transactions of Engineering Management*, 29(1), pp. 28-45.
- Trygg, L. (1993) "Concurrent Engineering Practices in selected Swedish Companies: A Movement or an Activity of the Few?", *Journal of Product Innovation Management*, 10(5), pp. 403-415.
- Wallach, E. J. (1983) "Individuals and Organizations: The Cultural Match". *Training and Development Journal*. February, pp. 29-36.
- Wolfe, R. (1994) "Organizational Innovation: Review, Critique and Suggested Research Directions", *Journal of Management Studies*, 31(3), pp. 405-431.

## **MANAGING ORGANIZATIONAL MEMORY IN ERP ADOPTION PROJECTS USING AN OMIS: KEY ISSUES AND CHALLENGES**

Effective use of organizational memory in the ERP adoption projects and assimilation of new knowledge and information created during adoption into the memory base for ongoing use, support and continuous improvement of the new systems is critical for the success of ERP in the organization. Organizations adopting ERP systems use organizational memory not only in re-designing their business processes, organization structure, roles, and decision-making rules, but they also embed many aspects of organizational memory in the ERP software applications. They depend heavily on supporting IS applications labeled as organizational memory information systems (OMIS) in the literature (Stein and Zwass, 1995) for providing a shared system for encoding, storage, maintenance, search, and retrieval of ERP systems related information by organizational members. We analyze the key issues and challenges faced by an organization in managing organizational memory during ERP implementation using an OMIS. The research presented is based upon our analysis of data collected during a detailed case study of a multi-site ERP implementation project in a large Canadian organization in the high technology sector.

### **Introduction**

It is commonly accepted in intellectual discourse that in the 'Information Age' knowledge is the most important differentiating factor in the long-term success of organizations. Problems that can be associated with creation of new knowledge, its retention and dissemination across the organization continue to challenge modern organizations. 'Knowledge management' and its sister concept 'organizational memory' are common glosses for the analysis and treatment of these problems (Randall *et al.*, 2001). Although organizations do not remember in the true sense of the word memory, *organizational memory* is a convenient metaphor used to define the knowledge and information known by the organization and the processes by which such information is acquired, stored, and retrieved by organizational members (Stein and Zwass, 1995; Walsh and Ungson, 1991).

Knowledge and information about decisions made and problems solved is the core content of an organization's memory over time. A number of advantages have been associated with the use of organizational memories such as supporting core competence, increased organizational learning, increased autonomy, integration of organizational actors, and lower transaction costs (Stein and Zwass, 1995). While complete reliance on the past can encase learning and blind decision makers to some important aspects of the environment, cautious appreciation of the past enhances the vision of a current decision situation (Walsh and Ungson, 1991). The role played by organizational memory in the innovation projects is extremely critical, as innovators must take it into account to avoid repeating mistakes while retaining the successful aspects of existing processes and products. ERP systems adoption is a complex exercise in process innovation with cross-functional enterprise-wide scope (Markus and Tanis, 2000). Adopting organizations remodel, automate, and integrate many business processes across

functional boundaries in the organization while putting the new systems in place. This makes the effective use of organization memory and assimilation of new knowledge and information created during adoption into the organizational memory base a critical and challenging activity for the successful adoption of ERP in the organization.

Managing organizational memory in ERP adoption is a critical and challenging issue due to many reasons. Traditionally, organizational memory has resided in the minds of individuals, organizational processes, culture, structure, ecology, and external archives as mental or structural artifacts, consciously retrieving memory from these bins is difficult (Walsh and Ungson 1991). It needs to be extended to the ERP project team, which in the current paradigm of outsourcing non-core skills, rely heavily on outside consultants for ERP implementation skills. The outside consultants often come in the organization for the duration of the project to help customize the new business applications, implement a strategic business process, or reengineer the IT infrastructure to support organizational needs. It is a significant challenge again to retain and maintain the vast amount of new knowledge and information generated from the implementation experience and makes it available for ongoing system support and use. Not much research is available on how to effectively manage organizational memory, none in the ERP adoption process. Most of the available research is conceptual where authors have emphasized the need for managing organizational memory in ERP implementation. For example, one of the studies report that disparities between memory content in the ERP systems and related content in other media, such as individual memories, the organizational structure and the organizational knowledge bases can lead to productivity loss for implementation team members and under-performance of ERP systems (Van Stijn and Wensley, 2001).

Advancements in information technologies such as databases, Intranets etc. have led to a number of applications to encode, retain, and retrieve organizational memory. Wijnhoven (1999) conceptualizes organization memory information systems (OMIS) as a framework for information technologies to support organizational memory. Growing environmental complexity and increased managerial and professional turnover has made it necessary for organizations to turn to information systems that support organizational memory. Information systems have become vital component of managing organizational memory (Stein and Zwass, 1995). Most ERP adopting organizations also rely heavily on one or another kind of organizational memory information systems to store, manage, and retrieve ERP related knowledge and information. These systems become the focal point of ERP related organizational learning. However, there have been a number of challenges which have plagued the development and effective use of OMIS (Wijnhoven, 1999).

While the importance of other media of organizational memory (Walsh and Ungson, 1991) is not underscored, in this paper, we focus on the effective use of OMIS in managing organizational memory in ERP adoption. We analyze critical problems and challenges faced by organizations in managing an organizational memory in an ERP adoption project using an OMIS. The analysis is based on data collected in a detailed case study conducted by the authors of a multi-site ERP adoption project in a large multi-national hi-tech organization. With both business and government organizations increasingly adopting ERP systems as a means to manage their operations, an investigation of challenges and organizational concerns in managing organizational memory in ERP adoption is timely and important. Missing links and difficulties in finding relevant process design information in the organization makes it difficult for managers to effectively use ERP systems. This research provides valuable insight and a platform for detailed research on how to effectively manage organizational memory using an OMIS. The next section provides a review of the existing literature related to organizational memory and ERP adoption process. Section 3 discusses the research design and background information of the case study. Section 4 presents the critical challenges and problems in managing organizational memory using an OMIS. The last section provides a brief conclusion and recommendation for future research.

## **Literature Review**

The literature reviewed for the study can be classified into two main areas: one related to the process of ERP adoption, and the second related to organizational memory and organizational memory information systems.

### **ERP Adoption Process**

*Enterprise Resource Planning* (ERP) systems are comprehensive packaged software applications that automate and integrate organizational business processes across functional boundaries. Adoption of these systems is considered one of the most complex exercises in organizational process innovation and change management (Markus and Tanis, 2000). An ERP system provides a varied and rich environment for process remodeling and introducing best practices to the organization. Organizations, however, cannot just depend on advanced information technologies to produce competitive advantage and business benefits (Powell and Dent-Micallef, 1997). The organizational innovation process of putting ERP systems in place to support business processes in innovative ways, and the development of complimentary business and human resources to exploit the new capabilities, is critical and important for deriving competitive advantage and business benefits.

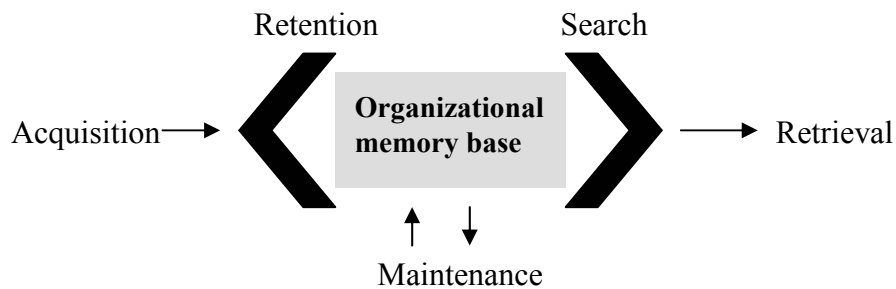
While there are unparalleled potential performance benefits, which motivate organizations to adopt ERP systems, realizing those benefits remains a challenge for most organizations (Markus and Tanis, 2000). Davenport (1998) refers to ERP adoption as a challenge of portfolio assembly, in which firms pull together a wide variety of programs with ERP modules as the core or backbone to meet their requirements. Achieving enterprise integration is the key idea behind the development and popularity of ERP systems. This posits using information technology to achieve a capability to plan and integrate enterprise-wide resources, i.e., by integrating the applications and processes of the various functions of the enterprise (design, production, purchasing, marketing, finance, etc.). Understanding the way business processes and enterprise policies are structured and how the business processes are related to one another, is important for achieving enterprise integration (Davenport, 1998). To ensure understanding of business processes, organizations must ascertain first that organizational memory is effectively used in configuring ERP systems. Second, for business continuity and ongoing use the new information and knowledge created in the adoption process must be assimilated in the organizational memory base. It is important for successful adoption that all organizational actors understand and use the re-engineered processes effectively.

### **Organizational memory**

In recent years there has been a significant growth of rhetoric concerning the 'Information Age' and 'Knowledge Economy,' paralleled with proposals to implement these concepts into something that is consequential for the organization. The concepts such as 'knowledge management' and 'organizational memory' can be understood exactly in this way. Specific theories have depicted organizations as information processing systems (Galbraith, 1977). To the extent that organizations exhibit characteristics of information processing, they should incorporate some sort of memory, although not necessarily resembling human memory. A number of theorists have since then attempted to explain the construct 'organizational memory' and list its contents (Walsh and Ungson, 1991). Although the concepts and theories built around the construct still remain fragmented, it has been generally recognized that organizational memory consists of mental and structural artifacts that have consequential effects on performance.

Memory is “the power or process of reproducing or recalling what has been learned and retained, especially through associative mechanisms” (Webster’s new Collegiate Dictionary, 1975). In the organizational context memory may be defined as stored information from an organization’s history that can be brought to bear on present decisions (Walsh and Ungson, 1991). An understanding of the content of organizational memory parallels individual memory. It, like individual memory, may contain both semantic (general) and episodic (context specific) information (El Sawy *et al.*, 1986). Semantic information includes organizational practices contained in handbooks, manuals, and standard operating procedures, as well as techno-scientific knowledge assimilated by the organization. Episodic information mainly includes engineering workarounds and contextually situated decisions and their outcomes. Organizations derive competence from both episodic memory and from an evolving semantic base of knowledge. While organizational memory by itself may not lead to organizational effectiveness, it can aid the design of new products and processes and has a definite impact on the organizational decision making process. It provides information and knowledge that enables the organization to function effectively.

**Organizational memory processes:** Organizational memory can be differentiated from general knowledge because it functions as a process and may be non-cognitive (Stein, 1995). The media and the processes that operate on this memory base are non-cognitive. These defining processes of organizational memory are acquisition, retention, maintenance, and retrieval (Stein, 1995), as shown in Figure 1.



**Figure 1. Processes of organizational memory (Stein, 1995, p. 26)**

Memory acquisition is the collection of new memory content, and memory maintenance is the process of adjusting existing memory to changed environments (application areas) in such a way that the basic part of the memory is still applicable despite these changes (Wijnhoven, 1999). Memory maintenance is about adapting and updating the memory, which may include forgetting obsolete memory and integrating new memory into the existing memory base (Wijnhoven, 1999). Memory retention is the storage of the memory contents in the memory media.

Memory search and retrieval processes deal with finding and obtaining memory contents after storage. The memory content may be stored in various physical locations (Simon, 1976), individuals (Argyris and Schon, 1978), accepted procedures (Cyert and March, 1963), and even standards of dress, protocol and furniture arrangement (Smith and Steadman, 1981). Walsh and Ungson (1991) describe the following storage media or bins for organizational memory: individuals, culture, structure, ecology, external archives. Retrieval of memory from the traditional storage media or bins described by Walsh and Ungson is difficult. Personnel turnover is a major threat to retaining this memory in the organization, as much of it is stored in the minds of individuals or documentation maintained by individuals.

**Organizational memory information systems (OMIS):** Information technology applications provide an excellent option for memory storage through which, organizational memory could be made more accessible to organizational members. The support for developing information systems to manage organizational memory emerged in the literature in the later half

of the 1980's and early 1990's. The work attempting to conceptualize IT-supported organizational memory is attributed to many authors who offered general characteristics of information systems to support organization memory (e.g. El Sawy et al., 1986; Sandoe et al., 1988.). Ackerman and Malone (1990) suggested developing specific information systems that may serve as nuclei to support organizational memory. Several task-specific memory information systems were also suggested in the literature over those years whose objectives overlapped to a certain extent e.g. Group/team memory systems (Nunamaker, 1991), Design rationale/discussion memory systems (Konda, 1991), Project memory systems (Lynch and Chen, 1992), Meeting memory systems (Sandoe et al., 1991), Topical memory systems (Ackerman and Malone, 1990), Document memory systems (Huhns et al., 1989), Environmental memory systems (Mascarenhas, 1989).

Stein and Zwass (1995) have defined an organization memory information systems (OMIS) as “ a system that functions to provide a means by which knowledge from the past is brought to bear on present activities, thus resulting in an increased level of effectiveness for the organization.” They conceptualize it as a means to improve the strategic alignment of memories and to support the integration and flow of organizational memories. An OMIS contains various types of knowledge and information, some of which is explicit (can be formalized or recorded). Other major memory contents are tacit, consisting of skills and not-expressed experiences. Tacit knowledge may be handled on the OMIS by referencing it to memory locations (such as skills databases) or by elicitation, so that it can be handled like explicit knowledge (Nonaka, 1994). An OMIS can be realized by integrated application of different types of information technologies (such as databases, knowledge bases, Intranet) to form an OMIS infrastructure. Content-wise, OMIS is not simply a knowledge base system, database or a group-ware, but might include characteristics of each of these. Process-wise, an OMIS might require various media and high levels of infrastructure maturity to enable it to perform as multiple subsystems serving one superstructure<sup>3</sup> (Wijnhoven, 1999).

The superstructure aligns the OMIS with strategic requirements and selects the specific mix of organizational functions to be supported. In the context of ERP adoption the superstructure is laid to realize strategic project requirements such as integration of the project sub-teams and their members, adaptation of the new systems to the organizational requirements, goal attainment, and maintenance of the social system. Organizations can choose from the wide range of technologies to build an infrastructure to support OMIS superstructure. For example, the key integration requirements necessitated by the superstructure would be integration of memory over space and time, which can be enabled by shared databases, knowledge bases and share work templates (delivered over a communication network). Similarly, adaptive, goal attainment, and social sub-systems of the OMIS may place requirements that may be enabled by technological components of the OMIS infrastructure such as Intranet, data-mining applications, Web-interface etc. Some of the other key requirements would include boundary-spanning activities to recognize, capture, organize, and distribute knowledge about the ERP environment from the appropriate organizational actors; assist organizational actors in planning and control; maintaining the human resources and training related information such as project descriptions, roles, skills, capabilities and aspiration of project personnel.

A mature and advanced technology infrastructure is necessary but not sufficient for managing organizational memory effectively. An effective superstructure, supporting organizational policies, understanding of the project requirements, user perceptions of usefulness and ease of use, training in using OMIS, and resources dedicated to memory management are some other key variables in the success of OMIS identified in the literature (Wijnhoven, 1999). The enterprise-wide scope and complexity of ERP adoption project make managing organizational memory a much more complicated task. A number of studies have looked at

---

<sup>3</sup> A conceptual framework referred to as superstructure by Stein and Zwass (1995) acts as a guide to OMIS development by providing objectives to the development endeavor.

challenges in the development and use of OMIS (e.g. Wijnhoven, 1999) and its sub-systems (e.g. Orlikowski, 1993; Bordetsky and Mark, 2000), but none in the specific context of ERP adoption. As observed in our study there were more than 20,000 documents in the OMIS by the end of phase 4 of the ERP implementation.

### Research Methodology

This study is based upon a detailed case study of a multi-site multi-phase ERP adoption project conducted by the authors in a large multi-national hi-tech organization with manufacturing operations in North America and Europe. In the late 1990's, the *Canadian Networking Technologies*<sup>2</sup> (CNT) was facing a rapidly changing marketplace. Evolution and growing acceptance of new technologies was driving the rapid expansion of e-commerce and shaping customer demands for greater speed, flexibility, and information. Achieving high levels of efficiency and becoming more responsive to customers was becoming critical. While a number of initiatives were introduced, the most important was a corporate-wide business transformation program enabled by ERP solutions to make the organization more responsive to business and market needs. ERP was implemented globally in four phases in the organization.

*Project Delivery Manager*<sup>2</sup> (PDM) is a lotus-notes based organizational memory information system that was used by CNT to manage ERP implementation specific information and knowledge. PDM was heavily relied upon for storing ERP project, design, and business process related information such as activity details, schematic flows, activity descriptions, and revision logs that were generated in the adoption process. PDM also provided a common access point to all stakeholders in the project to create, store, and search ERP and process-related information. All members of the project team could access the system across the globe through the corporate Intranet. The lotus notes provided capabilities for organizing and searching information systematically. A super structure that was provided by the consulting partner was used to provide uniformity, structure, and strategic alignment to memory content in PDM with project objectives.

PDM was undoubtedly the focal point of the adoption project for almost all ERP related information, but most members would not refer to the OMIS towards the end of phase four, when it had become very difficult for organizational members to find relevant information in PDM. In a lessons-learned survey of project team members after phase 4, PDM was highlighted by most of the members as the most critical issue affecting the project performance. Anecdotal evidence in the survey made it clear that there were numerous challenges faced by the organization in using PDM. For example one of the participants reported mismatch in information in activity designs in PDM and those implemented in the ERP system. *"When I look at a process in the PDM, it should reflect what actually was implemented...."* Another commented on the maintenance of the documents in PDM: *"There also has to be some thought about storing the documents and how they will be maintained/versioned after the release and into support."*

A focus group of 8 members representing IS support, Project Management Office, and Core team members was held by authors gather a preliminary understanding of the PDM issues and develop a probe for interviewing 15 other heavy users for greater insight into challenges faced by the organization use of OMIS. A participative observation strategy was also used to collect additional data, where one of the authors worked with the project team for a 3 months on different small projects using the OMIS extensively. It was observed that users of OMIS had different perceptions of the OMIS based on differences in their interactions and use of OMIS. A representative convenient sample of all roles was taken to get a good idea of the user concerns

---

<sup>2</sup> Actual name of the organization and OMIS has been changed for reasons of confidentiality.

and experiences. A brief description of the respondent roles and respondent interaction with the OMIS is provided in Table 1 to give a background understanding of their perspective.

| Interviewee Groups                 | No | Interviewees' main function w.r.t. OMIS                                                                            | Interaction with OMIS | Perspective                                                                                                                |
|------------------------------------|----|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------------------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Core Team Member                   | 7  | Main source of ERP enabled business process information and expertise                                              | Heavy                 | Members of the cross - functional team who produced ERP related while configuring the systems but mainly for their own use |
| Project Office Member              | 4  | Main source of project management and other semantic information such as user manuals, training documentation etc. | Heavy                 | OMIS administrators, as well as producers of goal attainment and semantic information, such as schedules, manuals etc.     |
| IS Support Team Member             | 5  | Key post implementation user for finding previous design decision related information                              | Heavy                 | Secondary data miners                                                                                                      |
| ERP User                           | 5  | Occasional user for seeking their role and functional related expertise                                            | Occasional            | Expertise seekers                                                                                                          |
| Process Owners/Functional Managers | 2  | Source of information about existing processes, rules of business and future needs                                 | Heavy                 | Responsible for validation of semantic project information compiled by project office                                      |

**Table 1. Description of Interviewees**

### Management Concerns

Interviews revealed the following key challenges (Table 2) in managing organizational memory using PDM at CNT.

Explication of knowledge: A large part of organizational information and knowledge resides in individual brains, which needs to be explicated before it can be stored in an organizational repository like PDM. Explication of knowledge was an important in the context of our study due to increased reliance on outside consultants in the implementation process. As one of the members of IS support commented consultants largely performed configuration with few local employees involved for process related expertise. They were now dependent on tedious investigation of the ERP coding to find out how it was configured as the consultants have now gone and even if some documentation exists there is little contextual information provided with it which makes understanding it fully difficult. The comment also indicated poor knowledge transfer between an upstream project activity (system configuration) and a downstream activity

---

Explication of knowledge  
Reliability of stored information  
Information bottlenecks  
Maintenance of knowledge  
Lean information storage practices  
Adequate level of training  
Continued vendor support  
Motivation for sharing knowledge  
Addressing security issues

---

**Table 2. Key Challenges identified in Managing Organizational memory in OMIS**

**(system support).**

Reliability of stored information: Reliability of the stored information was found was a key concern. As one of the respondents stated “The business process information in the PDM was often flawed and as a result I had to research my own information for problem resolution.” Documentation available in PDM has become unreliable by the end of phase 4 of the project, as often changes made to the system were not recorded in the documents stored in PDM. This forced users to re-collect information by contacting the people involved originally in process design rather than just re-using the process information available in the system. Oftentimes the people originally involved would have left the organization or may not be able to recall correctly. This made the process of re-collecting information tedious and inefficient. It also lead to delays in resolution of problems for which the information was needed. One of the IS support person interviewed commented “it sometimes take 3-4 days before the information is collected, as a result a high number of tickets are outstanding for resolution. We went live on time but now we are struggling with 3300 ticket in 1 year.”

Information bottlenecks: ERP adoption projects rely heavily on cross-functional teams. In many cases functional representatives on the team were drawn to participate on a part time basis. This created information bottlenecks when these members who provided the sole source of their function’s perspective were not available. When faced with deadlines, other members of the team sometimes proceeded with their limited information often leading to lengthy revisions later, after going live. These functional representatives were also the link between their function and the system who were not able to help much in later investigations of system related information to their functional colleagues when problems were faced in executing the process.

Maintenance of knowledge: Almost all interviewees commented that information in PDM was outdated. On probing the respondents on when and how did the information get outdated? It was revealed that only in Phases 3 and 4 that this problem was faced. We found by further probing the issue that knowledge information was not maintained properly in these releases. As one of the respondents commented: “a number of versions of similar information cluttered the scene and made the process of finding information frustrating.” Deficiencies in the information maintenance policy for PDM were also to be blamed for this situation. For example, even though owners of the information were defined, the policy was not explicit on their responsibility to update the information. As a result in the later releases the situation has deteriorated and it was left for the information seeker to dig out the required information through whatever means applicable.

Lean information storage practices: Information storage practices were highlighted as a key issue in the study as we found that there was no approach or policy specified on what information would be stored in the PDM. In the initial releases, when the use of PDM was evolving, users of the system applied caution and time was spent on sorting out what information should be placed on the system. However, as no shared criteria or lean practices for system use was evolved. Many users adopted a garbage dump approach by putting all related and unrelated information in the system. As a cumulative result of misuse the system was cluttered with a number of out-of-scope documents. At the time of our investigation the PDM had more than 20,000 documents.

Adequate level of training: One of the core team members who was interviewed had joined the team and the organization only during release 3; no training was provided to him on the use of PDM. This member commented “I would have got a lot more out of the PDM if we had chance to understand it more fully.” On investigating further we found that formal training to use the PDM was provided only in the initial release. Apparently the new members in the project teams never got adequate training on how to use the PDM effectively.

Continued vendor support: Continued vendor support in terms of new capabilities being introduced and bugs being resolved is an important factor in the success of third party software applications. Vendor support was found lacking in the case of PDM as no new capabilities were added to the software in form of improvements provided by the vendor to support growing needs of the project. For example, the system did not support storage of multimedia files while they were being developed in the release 4 for on the job training. One of the core team members commented: “at times it became a chore and something that blocked our ability to be creative.”

Motivation for sharing knowledge: One respondent commented on being probed why do you think documentation was deficient: “Writing up their understanding of key issues for the benefit of continuity was not a priority. The pressure was on to somehow roll the work over and meet the deadlines”. Providing facilities like PDM is not enough, a larger environment for knowledge sharing needs to be created by coaching and other organizational development activities. Motivation for knowledge sharing can be provided by building it in the organizational culture and reward structure so that organizational members would give it a high priority in their activities.

Addressing security issues: Some of the interviewees had reservations in putting some of the information on PDM that they considered was for a restricted audience only. The members could not ascertain who all would have access to the information.

### **Conclusion and Recommendations for further research**

This research is at an exploratory level as not much empirically supported research is available. While it does not produce generalizable results, valuable insight into the practitioner concerns in managing organizational memory information systems in organizational innovation process is provided. Transfer of work from consultants or contract staff to the organizational employees came up as an important issue. Where consultants were involved in the activities such as configuration many missing links in the organizational memory were created. These missing links had a significant impact on the performance of the ERP systems as that knowledge could not be traced back once the consultants had left the organization. This issue would be of significant importance to organizations facing a skill shortage who increasingly use atypical or contingent employees in some key activities such as systems integration. Explicit mention should be made in the contracts with these contingent employees on knowledge transfer and explication of knowledge in terms of detailed documentation.

This research provides a base for further research on managing organizational memory in organizational innovation projects. A natural extension to this research would be an empirical investigation in a multi-organizational setting. A study of how individuals use an OMIS in different types of organizations would also be useful in incorporating those perspectives in the management of OMIS.

## References

- Ackerman, M. S., and Malone, T. W., "Answer Garden: A Tool for Growing Organizational Memory," Proceedings of the ACM conference on office information systems, Cambridge, MA: 1990, 31-39.
- Argyris, C, and Schon, D. A., *Organizational Learning: A Theory of Action Perspective*, Addison-Wesley, Reading, MA: 1978.
- Bordetsky, A., "Mark, G., Memory Based feedback Control to Support Group-ware Coordination," *Information Systems Research*, 11(4), 2000,366-386.
- Cyert, R. M., and March, J. G., *A Behavioral Theory of the Firm*, Prentice-hall, Englewood Cliffs, NJ: 1963.
- Davenport, Thomas H., "Putting the Enterprise into the Enterprise System," *Harvard Business Review*, (July-August 1998) 121-132.
- El Sawy, O. A., Gomes, G. M., and Gonzalez, M. V., "Preserving Institutional Memory: The Management of History as an Organizational Resource," *Academy of Management Best paper Proceedings*, 37, 1986, 118-122.
- Gailbraith, J. R., *Organizational Design*, Addison-Wesley, Reading, MA: 1977.
- Huhns, M. N., Mukhopaddhyay, U., Stevens, L. M., and Bonell, R. D., "DAI for Document Retrieval: The MINDS Project," in *Distributed Artificial Intelligence*, Gasser, L., and Huhns, M. N., (Eds.), Vol. II, Morgan Kauffman, San Mateo, CA: 1989, 130-164.
- Konda, S., Monarch, I., Sargent, P., and Subrahmanian, E., "Shared Memory in Design," Report EDRC 05-56-91, Engineering Design Research Center, Carnegie Mellon University, Pittsburgh, PA: 1991.
- Lynch, K. J., and Chen, H., "Knowledge Discovery from Historical Data: An Algorithmic Approach," *Proceedings of the Twenty-Fifth Hawaii International Conference on System Science*, 1992, 70-73.
- Markus, M. L., and Tanis, C., "The Enterprise System Experience: From Adoption to Success," in *Framing the Domains of IT Management: Projecting the Future through the Past*, Zmud R. W. (ed.), Pineflex Educational Resources Inc., Cincinnati, OH: 2000,173-207.
- Mascarenhas, B., "Transactional Linkages and Strategy," in *International Strategic Management*, Negandhi, A. R., and Arun, S., (Eds.), Lexington Books, Lexington, MA: 1989, 53-67.
- Nunamaker, J. F. Jr., Dennis, A. R., and Valacich, J. S., "Electronic Meeting Systems to Support group Work," *Communications of the ACM*, 34(7), 1991, 40-61.
- Orlikowski, W. J., "Learning for Notes: Organizational Issues in Group-ware Development," *The Information Society*, 9(3), (July-Sept.1993), 237-250.
- Powell, T. C., and Dent-Micallef, A., "Information Technology as Competitive Advantage: The Role of Human, Business and Technology Resources," *Strategic Management Journal*, 18(5), 1997, 375-405.

- Nonaka, I., "A Dynamic Theory of Organizational Knowledge Creation", *Organization Science*, 5(1), 1994,14–37.
- Randall, D., Hughes, J., O' Brien, J., Rouncefield, M., and Tolmie, P., " Memories are made of this: Explicating Organizational Knowledge and Memory," *European Journal of Information Systems*, 10, 2001, 113-121.
- Sandoe, K., Olfman, L, and Mandiwala, M., "Meeting in Time: Recording the Workgroup Conversation," *Proceedings of the Twelfth International Conference of Information Systems*, New York, 1991, 261-271
- Simon, H. A., *Administrative Behavior*, Free Press, New York: 1976.
- Smith, K. G. and Steadman, L. E., "Present Value of Corporate History," *Harvard Business Review*, (Nov-Dec, 1998) 164-173.
- Stein, E., "Organizational Memory: Review of Concepts and Recommendations for Management," *International Journal of Information Management*, 15 (1), 1995, 17-32.
- Stein, E., and Zwass, V., "Actualizing Organizational Memory with Information Systems," *Information Systems Research*, 6(2), 1995, 85-117.
- Van Stijn, E., and Wensley, A., "Organizational Memory and the Completeness of Process Modeling in ERP systems: Some Concerns, Methods and Directions for Future Research," *Business Process Management Journal*, 7(3), 2001,181-194.
- Walsh, J.P., and Ungson, G.R., " Organizational Memory," *Academy of Management Review*, 16(1), 1991, 57-91.
- Wijnhoven, F., "Development Scenarios for Organizational memory Information Systems," *Journal of Management Information Systems*, 16(1), 1999, 121-146.

## **THE EFFECT OF QUALITY MANAGEMENT ON PURCHASING PERFORMANCE AND INTERNAL CUSTOMER SATISFACTION; A STRUCTURAL MODEL<sup>4</sup>**

The purpose of this article is to empirically examine a mediational model in which quality management practices have a direct impact on purchasing's internal customer satisfaction and an indirect impact mediated through purchasing performance. All measurement scales satisfy key measurement criteria including unidimensionality, convergent validity, discriminant validity, and reliability. The results support the model formulated.

### **Introduction**

Pressure on companies to remain profitable in an increasingly complex and competitive global marketplace has attracted management's attention to supply chain management (SCM). In this context, several authors have argued that the scope of SCM goes beyond the concept of integrated logistics and combines all business processes (Cooper et al., 1997), including quality management (Romano & Vinelli, 2001). Recent literature supports this view (e.g., Anderson et al., 1998; Fynes & Voss, 2002; Kuei et al., 2001; Millen et al., 1999; Romano & Vinelli, 2001; Salvador et al., 2001; Tan et al., 1999; Tracey, 1998).

An effective purchasing function has also been considered a key business process in the supply chain (Fawcett & Fawcett, 1995; Giunipero & Brand, 1996; Lambert et al., 1998). In this respect, purchasing's role in SCM is very important as an intermediary in the supply chain, connecting suppliers with purchasing's internal customers who, in turn, provide products and services for external customers (Stanley and Wisner, 2001).

Despite the importance of purchasing and quality management to supply chain success, to date, there has been relatively little research regarding quality management purchasing and its effect on purchasing performance and internal customer satisfaction. Consequently, the purpose of this research was to develop a framework that relates quality management purchasing with purchasing performance and internal customer satisfaction. More specifically, the objectives of this paper were to determine (1) if the implementation of quality management purchasing had a positive impact on purchasing performance, and (2) if these same practices had a positive effect on purchasing's internal customer satisfaction. To meet these objectives, the relevant literature was reviewed and hypotheses were developed and tested by means of structural equations modeling. The findings extend our understanding of quality management purchasing and its contribution to supply chain performance.

### **Literature Review**

Quality management has been a prominent area of study in SCM. For example, Kuei et al. (2001) concluded that improvements in supply chain quality management practices are

---

<sup>4</sup> Acknowledgment: The authors wish to thank Cajamurcia (Spain) for its financial support of this research.

associated with improvements in organizational performance. Tan et al. (1999) examined the impact of TQM, supply base management, and customer relations practices on corporate performance. The authors found that supplier evaluation and involvement in the buyer's decision process improved performance. Tan et al. (1999) concluded that performance improvement is more likely to happen if the company's quality and procurement implementation strategies, are in congruence with strategies in other business areas such as, finance, operations, marketing, new product development, and sales. Romano & Vinelli (2001) analyzed the differences in quality management between two different supply networks in an Italian textile company. Using a case study approach, the results evidenced that the "co-ordinated network" was characterized by more frequent and closer relationships with suppliers and customers compared to the "traditional network". The study also reported that the "co-ordinated network" had improved product quality and the overall production performance. Salvador et al. (2001) collected data from 164 plants to research whether the interaction of an organization with its supply chain partners (suppliers and customers) to manage the flow materials and ensure materials quality could improve time-related performance. One of the study's conclusions was that the interactions with suppliers for quality management had a positive impact on delivery and operations performance. More recently, Fynes & Voss (2002) investigated the effect of buyer-supplier relationships on quality management and performance. Fynes & Voss (2002) conclusion, among others, was that quality performance is highly influenced by quality design, and that partnership type relationships between members in the supply chain can directly improve quality design, and indirectly customer satisfaction.

Early research pertaining to quality management in purchasing used the supplier as the unit of analysis, and consisted of conceptual developments and case study reports. For example, Carter & Miller (1989) studied the impact of parallel and serial communication between buyer and supplier on materials quality performance. The authors concluded that parallel communication is more effective than serial communication in improving materials quality performance. In their case study of three automakers, Lascelles & Dale (1989) identified several barriers that could hinder the development of buyer-supplier relationship in a TQM system. The main factors identified were poor communication and feedback, supplier complacency, buyers having poorly defined and unstructured supplier quality improvement programs, credibility of buyers as perceived by their suppliers, and misconceptions regarding purchasing power. Giunipero & Brewer (1993) evidenced that a supplier evaluation and selection process based on TQM principles improves customer satisfaction and lowers costs due to better communication and increased use of data. Stuart & Mueller (1994), in a longitudinal case study, reported increases in productivity and quality from the establishment of partnering relationships with suppliers.

In contrast, a relatively small number of papers have used the purchasing function as the unit of analysis. For example, Burt (1989) stressed the critical importance of teamwork, supplier selection, and supplier management in a successful quality oriented procurement. Carter & Narasimhan (1994) described the first empirical effort using field research to analyze the role of the purchasing function in a TQM environment. The authors found evidence of the interaction between purchasing and manufacturing in quality improvement, purchasing personnel autonomy, use of supplier improvement, supplier qualification and supplier certification programs. In a later work (Carter et al., 1998) the same authors developed a instrument to measure TQM in purchasing and identified seven distinctive factors namely: importance of the purchasing function, interaction with suppliers, interaction with other functional areas, human resources management, influence over suppliers, competitive focus and structure and organization of purchasing. However, there are some concerns about the reliability and content validity of the instrument developed since some of the factors included indicators that did not represent the factor they were intended to measure.

Giunipero & Vogt (1997) collected data from 85 purchasing managers and analyzed the commitment to empowerment, adoption of TQM and continuous improvement techniques, and the use of different types of teams in the purchasing function. One of the main conclusions of this

study was that purchasing could play a key role in employee empowerment and TQM implementation. Brookshaw & Terziovski (1997) found significant differences in customer satisfaction between companies that had implemented quality-oriented purchasing and those who did not. However, as the same authors pointed out, the scale used to measure the construct quality-oriented purchasing had limited reliability. In contrast, Caddick & Dale (1998) did not find evidence of a revised role of purchasing in a TQM environment. However, the findings of the research suffer from a lack of generalization since they only report empirical evidence from a single case study. A study by Stanley & Wisner (1998; 2001; 2002) and Wisner & Stanley (1999) evaluated the implementation of purchasing activities and cooperative supplier relationships associated with high levels of internal and external quality service (customer satisfaction). The main conclusion derived from Stanley & Wisner (1998; 2001; 2002) and Wisner & Stanley (1999) is that the purchasing function plays a key role in the integration and communication of quality expectations and the achievement of better quality performance. However, these studies failed to test the effect of quality management purchasing on purchasing performance and internal customer satisfaction. However, these studies fail to consider such quality management elements as personnel management, cross-functional co-ordination and bench marking.

Despite the importance and theoretical development of quality management, and the recognition of the purchasing function as a major role player in it, there is little published empirical research about quality management in the purchasing function: what practices define it and how do they relate to purchasing performance and internal customer satisfaction? Consequently, this paper describes a survey effort to study contemporary quality management practices in the purchasing function and their relationship with purchasing performance and internal customer satisfaction.

### **Theoretical Framework and Hypotheses**

There are three relationships portrayed in our theoretical model shown in Figure 1. Overall, there is consistent support in the literature for a positive relationship between quality management and the overall company's operational performance and customer satisfaction (e.g., Anderson et al., 1994; Choi & Eboch, 1998; Curkovic et al., 2000; Dean & Bowen, 1994). Therefore, it would be reasonable to assume that the implementation of quality management purchasing would be related with purchasing performance and internal customer satisfaction. Each of the constructs is discussed below.

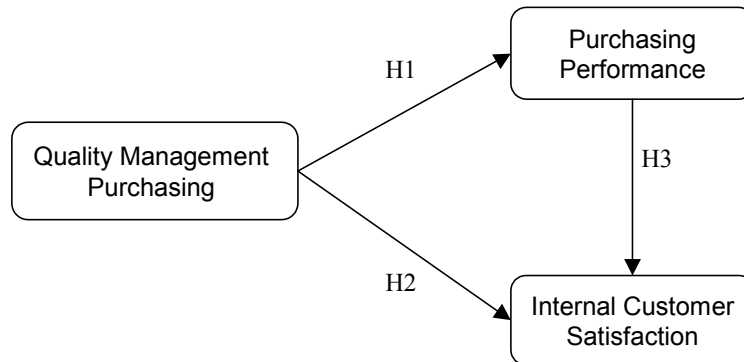
#### **Quality management purchasing**

A TQM strategy is aimed at reducing quality problems and increasing customer satisfaction. According to the literature the basic elements of a TQM strategy would include the following (see, for example, Ahire et al., 1996; Anderson et al., 1994; Black & Porter, 1996; Flynn et al., 1994; Powell, 1995; Saraph et al., 1989): top management support, personnel management, process management, customer relationships, supplier relationships, quality information, product design, and benchmarking.

Based on these TQM basic elements and using the purchasing function as the unit of analysis, a similar set of key elements could be develop to define quality management purchasing. Therefore, the six following salient factors or constructs define quality management purchasing: supplier quality management, personnel management, cross-functional coordination, quality information, management commitment, and benchmarking (see Figure 2). No equivalent quality management purchasing element was developed for "process management" since it refers to the use of statistical process control to manage the quality in the manufacturing process (Ahire et al., 1996; Anderson et al., 1994; Black & Porter, 1996; Flynn et al., 1994; Saraph et al., 1989). Cross-functional design, which describes the interaction of purchasing with internal customer

departments and purchasing's involvement on the firm's new product development process, incorporates elements of "customer relationships" and "product design".

A brief description of each construct along with selected literature that supports and describes them is presented in Table I. In addition, the items used to operationalize each construct are shown in the Appendix.



**Figure 1:** Theoretical Framework

### **Purchasing Performance**

This construct was based on Chao's et al. (1993) objective criteria for evaluating purchasing performance, which is operationalized by measuring the quality of purchased items, on-time delivery, actual vs. target cost, process order cycle time, and accuracy. The process order cycle time (average time from the receipt of the requisition until the purchase order is sent to a supplier) and accuracy criteria (number of errors made by purchasing in such areas as specifications, quantity, price, due date, etc.) were not included in this construct since they were incorporated in the internal customer satisfaction construct under the "reliability" and "responsiveness" elements. In contrast, we decided to include an indicator referred to materials inventory performance since it is a common evaluation area of purchasing performance (Leenders et al., 2002). Therefore, the purchasing performance construct included measures of the quality of purchased items, on-time delivery, actual vs. target cost of materials, and level of achievement of inventory goals (see the Appendix for measurement indicators).

### **Internal Customer Satisfaction**

Several studies in the literature have used the concept of service quality to evaluate internal customer satisfaction levels (Stanley & Wisner, 1998; 2001; 2002; Young & Varble, 1997). For the purchasing function, the customer is the company department for whom the material or service is purchased and thus are defined as internal customers. A widely used instrument to measure customer satisfaction has been the SERVQUAL questionnaire developed by Parasuraman et al. (1985; 1988). Accordingly, customer satisfaction was operationalized following the set of service quality dimensions identified by Parasuraman et al. (1985; 1988) namely: reliability (the ability of the purchasing department to perform the promised service dependably and accurately), responsiveness (the willingness of the purchasing department to help internal customers and provide prompt service), assurance (the knowledge and courtesy of purchasing department's employees and their ability to convey trust and confidence), empathy (the caring, individualized attention the purchasing department provides to customers) and tangibles (the appearance of the purchasing department's physical facilities, equipment, personnel, and communication material). The purchasing's internal customer satisfaction construct was measured accordingly and the measurement indicators used are listed in the Appendix. Some authors have argued that performance-based measures are more effective for

evaluating service quality than SERVQUAL (e.g., Cronin & Taylor, 1994; Teas 1994). The SERVQUAL model was chosen as the measurement tool for this investigation because it is a widely used research instrument that provides the breadth and accuracy to capture the complexities of the construct internal customer satisfaction. Future research could attempt to compare and contrast these two models incorporating performance-based measures into the operationalization of this construct.

**Table I:** Constructs Pertaining to Quality Management Purchasing

| Action program                | Description                                                                                                                                         | Selected literature                                                                                                                                                                                                                                                                                                      |
|-------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Management Commitment         | Purchasing management committed to total quality                                                                                                    | Ahire et al. (1996), Anderson et al. (1994); Black and Porter (1996); Curkovic et al. (2000); Flynn et al. (1994), Powell (1995), Saraph et al. (1989)                                                                                                                                                                   |
| Cross-Functional Coordination | Coordination with other functional areas in the company to improve quality                                                                          | Anderson et al. (1994), Burt (1989), Carter and Narasimhan (1994), Carter et al. (1998), Dean and Bowen (1994), Giunipero and Vogt (1997)                                                                                                                                                                                |
| Personnel Management          | Management of employees based on empowerment, training, teamwork, performance evaluation, and reward and recognition                                | Ahire et al. (1996), Anderson et al. (1994); Black and Porter (1996); Carter and Narasimhan (1994), Carter et al. (1998), Carter et al. (2000), Curkovic et al. (2000), Flynn et al. (1994), Powell (1995), Saraph et al. (1989), Youndt et al. (1996)                                                                   |
| Supplier Quality Management   | Establishment of cooperative relationships with suppliers and enhancement of suppliers' capabilities to improve quality                             | Carter and Narasimhan (1994), Carr and Pearson (1999), Carter et al. (1998), Dowlatsahi, (1998), Dyer (1997), Ellram and Hendrick (1995), Flynn et al. (1994), Krause (1999), Krause et al. (2000), Lascelles and Dale (1989), Powell (1995), Saraph et al. (1989), Stuart and Mueller (1994), Trent and Monczka, (1999) |
| Quality Information           | Effective evaluation and monitoring of customer satisfaction levels, purchasing and supplier quality performance                                    | Ahire et al. (1996), Anderson et al. (1994); Black and Porter (1996); Flynn et al. (1994), Powell (1995), Saraph et al. (1989)                                                                                                                                                                                           |
| Benchmarking                  | Evaluation and improvement of the company's purchasing process and performance by analyzing other organizations' purchasing process and performance | Ahire et al. (1996), Black and Porter (1996); Camp (1989), Carr and Smeltzer (1999), Powell (1995), Hackman and Wageman (1995)                                                                                                                                                                                           |

## Hypotheses

Quality management purchasing should correlate positively with performance, otherwise there would be little interest in their implementation by companies. Brookshaw and Terziovski (1997; p. 257) stated that "a clearly understood purchasing strategy in alignment with an organization-wide TQM culture and business strategy is expected to intensify the overall delivery of value to the customer." However, as the same authors pointed out, the empirical evidence is minimal.

It has been found that the implementation of supplier quality management lower materials costs, increase quality of materials, reduce delays in deliveries from suppliers, and eliminate mistakes in quantities ordered and received (Anderson *et al.*, 1995; Lamming, 1993; Noordewier *et al.*, 1990; Vonderembse & Tracey, 1999; Watts & Hahn, 1993). However, the successful

implementation of supplier quality management is preceded by the existence of an effective quality information system (Krause, 1999; Lascelles & Dale, 1989). The literature has also suggested that the ability of the purchasing function to provide the optimum service to their internal customers is influenced by supplier's performance levels (Stanley & Wisner, 2001; Wisner & Stanley, 1999).

Additionally, empirical research in TQM has evidenced that cross-functional coordination and management commitment are positively correlated with quality performance and service quality (Curkovic *et al.*, 2000), and that company performance is positively correlated with personnel management (Carter *et al.*, 2000) and benchmarking (Carr & Smeltzer, 1999). Therefore, and according to previous evidence from the literature, the adoption of quality management purchasing is expected to directly increase purchasing performance and internal customer satisfaction. However, the effect of quality management purchasing on internal customer satisfaction could also be indirect through operational performance, which is an intermediate performance outcome. Thus, the following hypotheses were formulated:

H1: quality management purchasing has a positive direct impact on purchasing performance

H2: quality management purchasing has a positive direct impact on internal customer satisfaction

H3: purchasing performance has a direct positive impact on internal customer satisfaction

## **Research methodology**

### **Sample description**

The sample frame consisted of 1,200 purchasing managers who were selected from the Duns and Bradstreet database of the largest manufacturing companies in Spain. Purchasing managers were determined as the most appropriate respondents, because they are most familiar with their organization's purchasing practices and performance outcomes.

The survey was administered in three mailings following a modified version of Dillman's (1978) *Total Design* for survey research. In the first mailing, a cover letter explaining the purpose of the study and a survey questionnaire along with a postage-paid envelope were sent to all members in the sample frame. A letter encouraging non-respondents to participate in the research was sent three weeks later. Six weeks after the initial mailing, a second survey and cover letter were sent to the remaining non-respondents. The respondent sample was composed of high-level purchasing executives, including 145 directors of purchasing (48%), 89 general managers of purchasing (29%), 19 purchasing managers (6%), and 45 "other" titles (17%).

Of the 1,200 surveys mailed, eight were returned undeliverable. Three hundred and six usable responses were received, which translates into a 25 percent response rate. Two approaches were used to assess non-response bias. The first approach consisted of comparing early with late respondents following Armstrong and Overton's (1977) recommendations. No significant differences were found between early and late respondents on such variables as sales volume, number of employees, and cost of raw materials and components. The second approach involved a comparison in terms of sales and number of employees between responding firms and non-responding firms (see Table II). Because no significant differences were found between the two sample groups, the respondent's sample was considered representative of the targeted industries.

Respondents reported an average of 779 employees and a total of 50 percent of the companies employed between 101 and 500 employees (155 firms). The largest firm employed

15,000 workers and had also the highest annual sales (€ 5.4 billion). A diverse group of manufacturing organizations participated in the study. In descending order of response frequency, food, automotive components, miscellaneous manufacturing, and chemicals were the most widely represented industries in the respondent group (see Table III). Annual gross sales for the year 2000 of the companies surveyed ranged from 34 million Euros (€) to € 5.4 billion, with an average annual sales of € 141 million.

**Table II:** Comparisons Between Respondents and Non-Respondents (Duns & Bradstreet Database)

|                         |                 | n   | Mean   | Standard Deviation | Significance |
|-------------------------|-----------------|-----|--------|--------------------|--------------|
| Sales (million Euros €) | Non-Respondents | 898 | 169.38 | 514.11             | 0.383        |
|                         | Respondents     | 302 | 141.61 | 349.83             |              |
| Number of employees     | Non-Respondents | 890 | 536    | 1,024              | 0.637        |
|                         | Respondents     | 302 | 568    | 932                |              |

**Table III:** Respondents' Industries as Reported in the Sample

| Industry                                  | Frequency | Percentage |
|-------------------------------------------|-----------|------------|
| Food and beverage                         | 58        | 18.9%      |
| Auto components                           | 46        | 15.0%      |
| Miscellaneous manufacturing               | 40        | 13.4%      |
| Chemicals                                 | 38        | 12.4%      |
| Machinery                                 | 20        | 6.5%       |
| Pharmaceutical products                   | 15        | 4.9%       |
| Construction materials                    | 14        | 4.6%       |
| Telecommunications & electronic equipment | 12        | 3.9%       |
| Electricity materials                     | 12        | 3.9%       |
| Primary metals                            | 12        | 3.9%       |
| Paper                                     | 11        | 3.6%       |
| Electric appliances                       | 10        | 3.3%       |
| Non ferrous metallurgy                    | 9         | 2.9%       |
| Textile                                   | 9         | 2.9%       |
| Total                                     | 306       | 100.0%     |

### Scale development

A list of quality management purchasing activities was compiled based on the literature reviewed. Operations management faculty were used as expert judges for content validation to determine how well the chosen items represented the defined constructs. Purchasing managers at five manufacturing sites were interviewed while they reviewed the questionnaire to identify any language ambiguities and perceived omissions of other relevant practices not included in the survey. The discrepancies and comments were used to further refine the instrument.

The survey instrument measured 25 items referred to quality management purchasing (see Table IV), 4 items related to purchasing performance, and 5 items related to internal customer satisfaction (see Table V). In order to measure those items, respondents were asked to indicate the degree of agreement or disagreement with the statements listed in the Appendix, using five-point Likert scales, where 1 represented "strongly disagree" and 5 represented "strongly agree." For example, for item V1 in Table IV, pertaining to predominance of quality over other purchasing objectives, the question in the survey instrument was: "Indicate your agreement or disagreement with the following statement: Purchasing management communicates to purchasing employees that quality is the most important purchasing objective."

**Table IV:** Quality Management Purchasing

|                                                   |                                                              | Standardized |         |         |
|---------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------|--------------|---------|---------|
| Construct / Item                                  |                                                              | Coefficient  | t-value | p-value |
| Management Commitment ( $\alpha = 0.71$ )         |                                                              |              |         |         |
| V1                                                | Predominance of quality over other purchasing objectives     | 0.793        | 13.112  | 0.000   |
| V2                                                | Purchasing management's evaluation based on quality          | 0.633        | 10.465  | 0.000   |
| V3                                                | Predominance of quality in supplier selection and evaluation | 0.569        | 9.336   | 0.000   |
| Cross-Functional Coordination ( $\alpha = 0.69$ ) |                                                              |              |         |         |
| V4                                                | Purchasing's interaction with quality                        | 0.600        | 9.603   | 0.000   |
| V5                                                | Purchasing's interaction with production                     | 0.741        | 11.814  | 0.000   |
| V6                                                | Purchasing's interaction with new product development        | 0.600        | 9.594   | 0.000   |
| Personnel Management ( $\alpha = 0.75$ )          |                                                              |              |         |         |
| V7                                                | Job autonomy                                                 | 0.478        | 8.040   | 0.000   |
| V8                                                | Job security                                                 | 0.636        | 11.282  | 0.000   |
| V9                                                | Involvement in decisions                                     | 0.517        | 8.805   | 0.000   |
| V10                                               | Training                                                     | 0.666        | 11.944  | 0.000   |
| V11                                               | Teamwork                                                     | 0.695        | 12.605  | 0.000   |
| V12                                               | Reward and recognition                                       | 0.483        | 8.138   | 0.000   |
| Supplier Quality Management ( $\alpha = 0.76$ )   |                                                              |              |         |         |
| V13                                               | <i>Certification of suppliers under ISO 9000</i>             | 0.430        | 7.195   | 0.000   |
| V14                                               | Supplier evaluation                                          | 0.713        | 13.169  | 0.000   |
| V15                                               | Supplier reward and recognition                              | 0.558        | 9.695   | 0.000   |
| V16                                               | Training for suppliers                                       | 0.609        | 10.783  | 0.000   |
| V17                                               | Supply base rationalization                                  | 0.206        | 3.317   | 0.000   |
| V18                                               | Sharing of information                                       | 0.677        | 12.320  | 0.000   |
| V19                                               | Interaction with suppliers in materials improvement          | 0.688        | 12.572  | 0.000   |
| Quality Information ( $\alpha = 0.82$ )           |                                                              |              |         |         |
| V20                                               | Collection of quality performance information                | 0.851        | 16.683  | 0.000   |
| V21                                               | Reporting of quality information to purchasing               | 0.850        | 16.653  | 0.000   |
| V22                                               | Reporting of quality information to suppliers                | 0.628        | 11.415  | 0.000   |
| Benchmarking ( $\alpha = 0.72$ )                  |                                                              |              |         |         |
| V23                                               | Formal procedure for benchmarking                            | 0.636        | 10.578  | 0.000   |
| V24                                               | Benchmarking the purchasing process                          | 0.845        | 13.951  | 0.000   |
| V25                                               | Benchmarking purchasing performance                          | 0.536        | 8.847   | 0.000   |

**Table V: Measurement Model Results**

|     | Construct / Item                                   | Standardized Coefficient | <i>t</i> -value | <i>p</i> -value |
|-----|----------------------------------------------------|--------------------------|-----------------|-----------------|
|     | Quality Management Purchasing ( $\alpha = 0.75$ )  |                          |                 |                 |
| CV1 | Management Commitment                              | 0.519                    | 8.667           | 0.000           |
| CV2 | Cross-Functional Coordination                      | 0.477                    | 7.869           | 0.000           |
| CV3 | Personnel Management                               | 0.769                    | 13.829          | 0.000           |
| CV4 | Supplier Quality Management                        | 0.651                    | 11.304          | 0.000           |
| CV5 | Quality Information                                | 0.567                    | 9.604           | 0.000           |
| CV6 | Benchmarking                                       | 0.433                    | 7.075           | 0.000           |
|     | Purchasing Performance ( $\alpha = 0.68$ )         |                          |                 |                 |
| V26 | Quality                                            | 0.521                    | 8.614           | 0.000           |
| V27 | Delivery                                           | 0.746                    | 13.010          | 0.000           |
| V28 | Quantity                                           | 0.699                    | 12.084          | 0.000           |
| V29 | Cost                                               | 0.372                    | 5.936           | 0.000           |
|     | Internal Customer Satisfaction ( $\alpha = 0.69$ ) |                          |                 |                 |
| V30 | Reliability                                        | 0.445                    | 7.249           | 0.000           |
| V31 | Empathy                                            | 0.714                    | 12.484          | 0.000           |
| V32 | Assurance                                          | 0.433                    | 7.038           | 0.000           |
| V33 | Responsiveness                                     | 0.761                    | 13.431          | 0.000           |
| *   | Tangibles                                          | -                        | -               | -               |

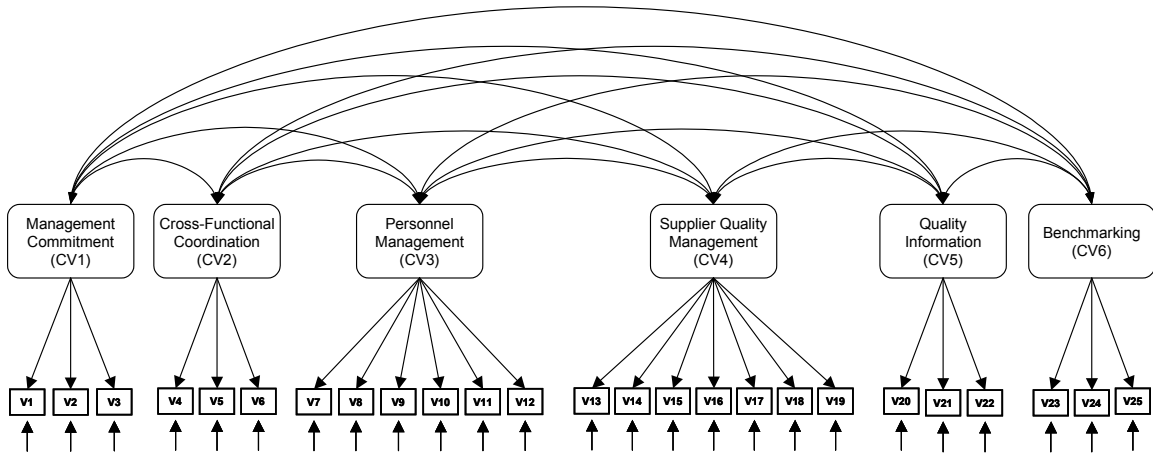
\*Item dropped during validity and reliability analyses

## Results

### Construct validation

Confirmatory factor analysis (CFA) was conducted to address the reliability and validity of the study's constructs (Anderson and Gerbing, 1988). We first examined the convergent and discriminant validity of all scales pertaining to the quality management purchasing to their respective constructs (management commitment, cross-functional coordination, personnel management, supplier quality management, quality information and benchmarking) through a confirmatory factor analysis (see Figure 2). The scale items used to measure these constructs are displayed in the Appendix. Multiple fit criteria were used to assess the appropriateness of the measurement models tested (Bollen and Long, 1993; Hair et al, 1995). The fit indexes for the CFA showed values above or equal to the recommended minimum levels as shown in Table VI, indicating that the model had a reasonably good fit.

Convergent validity is demonstrated when a set of alternative measures accurately represents the construct of interest (Churchill, 1979). For this study, convergent validity was assessed reviewing the level of significance for the factor loadings. If all the individual item's factor loadings are significant, then the indicators are effectively measuring the same construct (Anderson and Gerbing, 1988). As can be seen from the figures in Table IV, the coefficients for all indicators were high and strongly significant (*t*-values > 2.576; *p* < 0.01). These results provide satisfactory evidence of convergent validity for the indicators used to measure the six quality management purchasing constructs.



**Figure 2:** Quality Management Purchasing Confirmatory Factor Analysis

**Table VI:** Fit Indexes

| Fit Measures                | Suggested values | Quality management purchasing CFA | Full model |
|-----------------------------|------------------|-----------------------------------|------------|
| Chi-Square ( $\chi^2$ )     |                  | 413.65                            | 131.77     |
| Degrees of freedom ( $df$ ) |                  | 260                               | 74         |
| $p$ - value                 | $\geq 0.05$      | 0.00                              | 0.00       |
| $\chi^2/df$                 | $\leq 3.00$      | 1.59                              | 1.78       |
| RMSEA                       | $\leq 0.10$      | 0.044                             | 0.051      |
| RMSR                        | $\leq 0.10$      | 0.055                             | 0.053      |
| NNFI                        | $\geq 0.90$      | 0.91                              | 0.92       |
| CFI                         | $\geq 0.90$      | 0.92                              | 0.93       |
| GFI                         | $\geq 0.90$      | 0.90                              | 0.94       |

Discriminant validity can be assessed by fixing the correlation between various constructs at 1.0, then re-estimating the modified model (Segars and Grover, 1993). By fixing one of the correlations to 1.0 we convert a two-construct model into a one-construct model. The condition of discriminant validity is met if the difference of the chi-square statistics between the constrained and standard models is significant (1  $df$ ). The chi-square difference tests indicates that discriminant validity exists between such constructs as management commitment, cross-functional coordination, personnel management, supplier quality management, quality information, and benchmarking ( $p < 0.001$ ) (see Table VII; *quality management purchasing constructs*).

Scale reliability provides a measure of the internal homogeneity of the items comprising a scale (Churchill, 1979) and it was calculated as follows: (square of summation of factor loadings)/ ( (square of summation of factor loadings) + (summation of error variances) ) (Fornell and Larcker, 1981; Hair et al., 1995). With the only exception of cross-functional coordination all quality management purchasing constructs displayed composite reliability values in excess of 0.70 (see Table IV), providing enough evidence of the reliability of the scales used. We aggregated the scores for all six quality management constructs by calculating the average of the individual scores for the items comprising that construct obtaining the composite variables CV1 to CV6 (see Figure 2). For example, the mean of the responses from manifest variables V1 to V3 was computed to determine the composite measure for management commitment (CV1).

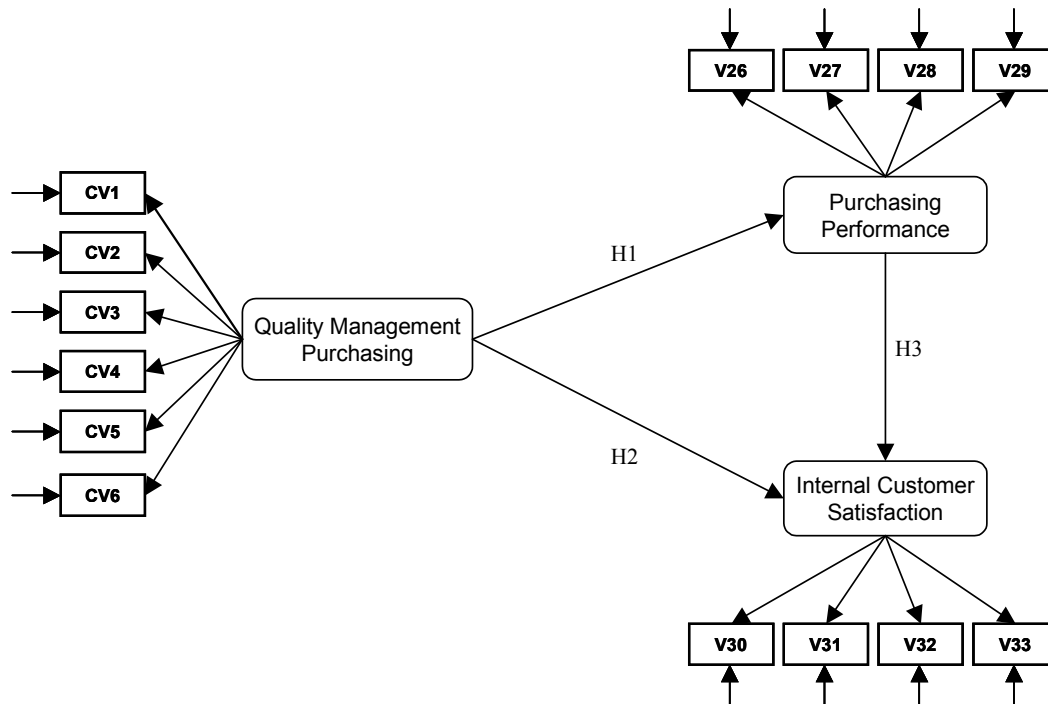
**Table VII: Assessment of Discriminant Validity**

|                                                        |        | Chi-Square statistic |               |            |                 |
|--------------------------------------------------------|--------|----------------------|---------------|------------|-----------------|
|                                                        |        | Constrained          | Unconstrained | Difference | <i>p</i> -value |
| Correlations                                           |        | model (d.f.)         | model (d.f.)  |            |                 |
| <b><i>Quality Management Purchasing constructs</i></b> |        |                      |               |            |                 |
| Management Commitment with                             |        |                      |               |            |                 |
| Cross-Functional Coordination                          | 0.471* | 20.15 (8)            | 122.68 (9)    | 102.53     | 0.000           |
| Personnel Management                                   | 0.538* | 38.99 (26)           | 148.90 (27)   | 109.91     | 0.000           |
| Supplier Quality Management                            | 0.383* | 56.34 (34)           | 215.19 (35)   | 158.85     | 0.000           |
| Quality Information                                    | 0.282* | 18.48 (8)            | 175.35 (9)    | 156.87     | 0.000           |
| Benchmarking                                           | 0.177* | 7.70 (8)             | 178.67 (9)    | 170.97     | 0.000           |
| Cross-Functional Coordination with                     |        |                      |               |            |                 |
| Personnel Management                                   | 0.498* | 42.49 (26)           | 144.97 (27)   | 102.48     | 0.000           |
| Supplier Quality Management                            | 0.389* | 58.87 (34)           | 181.14 (35)   | 122.27     | 0.000           |
| Quality Information                                    | 0.267* | 6.48 (8)             | 151.25 (9)    | 144.77     | 0.000           |
| Benchmarking                                           | 0.347* | 23.87 (8)            | 152.64 (9)    | 128.77     | 0.000           |
| Personnel Management with                              |        |                      |               |            |                 |
| Supplier Quality Management                            | 0.635* | 90.52 (64)           | 261.53 (65)   | 171.01     | 0.000           |
| Quality Information                                    | 0.496* | 56.85 (26)           | 343.25 (27)   | 286.40     | 0.000           |
| Benchmarking                                           | 0.536* | 52.55 (26)           | 191.38 (27)   | 138.83     | 0.000           |
| Supplier Quality Management with                       |        |                      |               |            |                 |
| Quality Information                                    | 0.503* | 49.30 (34)           | 328.03 (35)   | 278.73     | 0.000           |
| Benchmarking                                           | 0.455* | 61.19 (34)           | 202.18 (35)   | 140.99     | 0.000           |
| Quality Information with                               |        |                      |               |            |                 |
| Benchmarking                                           | 0.276* | 9.04 (8)             | 175.39 (9)    | 166.35     | 0.000           |
| <b><i>Full model constructs</i></b>                    |        |                      |               |            |                 |
| Quality Management Purchasing with                     |        |                      |               |            |                 |
| Purchasing Performance                                 | 0.471* | 71.67 (34)           | 206.34 (35)   | 134.67     | 0.000           |
| Internal Customer Satisfaction                         | 0.484* | 51.37 (34)           | 216.35 (35)   | 164.98     | 0.000           |
| Purchasing Performance with                            |        |                      |               |            |                 |
| Internal Customer Satisfaction                         | 0.732* | 23.56 (19)           | 71.33 (20)    | 47.77      | 0.000           |

\* Correlation is significant at the 0.05 level (2-tailed)

We then proceeded to examine the convergent and discriminant validity of the three key constructs of our study –quality management purchasing with six indicators, purchasing performance with four indicators, and internal customer satisfaction with four indicators. The resulting theoretical framework in LISREL notation is shown in Figure 3.

The fit indexes showed a good fit of the full measurement model to the data (Table VI). The results in Table V show that coefficients for all indicators were high and strongly significant ( $t$ -values  $> 2.576$ ;  $p < 0.01$ ) demonstrating the convergent validity of the constructs. In order to test the discriminant validity of the three key constructs, pair-wise comparisons were performed, where a model in which the correlation was constrained to one was compared with an unconstrained model. The results, as shown in Table VII (*full model constructs*), provide strong support for the discriminant validity of the constructs. Scale reliabilities (Fornell and Larcker, 1981; Hair et al., 1995) were above the recommended minimum of 0.60 for exploratory studies (Churchill, 1979). Table V displays the composite reliability values for each construct.



**Figure 3:** Theoretical Framework in LISREL Representation

### Hypothesis testing and discussion

The hypotheses were tested using Structural Equation Modeling (SEM). SEM is an appropriate statistical technique when assessing the relationships among latent constructs that are measured by multiple scale items, where at least one construct is both a dependent and an independent variable (Hair et al., 1995). For this reason, we tested the study's hypotheses using structural equation modeling.

As recommended by many researchers, multiple fit criteria were assessed to rule out measuring biases inherent in the various measures (Bollen and Long, 1993; Hair et al., 1995). The indices indicated an excellent fit between the data and the model. The ratio  $\chi^2/\text{df}$  (231.47/130) and RMS with values of 1.78 and 0.053 respectively, were below the recommended maximum of 3.00 and 0.10 (Chau, 1997). Similarly, the index RMSEA was below the 0.10 minimum acceptable level, with a value of 0.050. Additionally, the indexes NNFI, CFI, and GFI were all above the minimum acceptable 0.90 level, with values of 0.92, 0.93, and 0.94 respectively. The results of the structural model estimation are shown in Figure 4.

The test of the proposed hypotheses is based on the direct effects in the structural model. LISREL coefficients between latent variables give an indication of the relative strength of each relationship (Jöreskog and Sörbom, 1993). Each of the three hypotheses were tested at the significance level  $p < 0.05$ , two tailed.

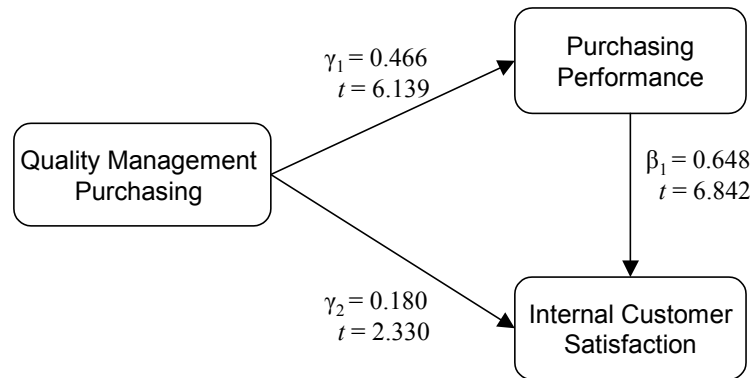
The first hypothesis asserts that *quality management purchasing has a positive direct impact on purchasing performance*. According to the results shown in Figure 4, the path relating these two constructs was positive and significant (standardized  $\gamma_1$  coefficient = 0.466;  $t$ -value = 6.139;  $p < 0.01$ ); thus, providing strong evidence supporting hypothesis one. This indicates that the adoption of quality management purchasing increases the level of purchasing performance (quality of materials purchased, ensure on-time delivery from suppliers, meet material expending targets, and achieve inventory goals).

The second hypothesis states that *quality management purchasing has a positive direct impact on internal customer satisfaction*. According to the results shown in Figure 4, the path

between quality management purchasing and internal customer satisfaction was positive and significant (standardized  $\gamma_2$  coefficient = 0.18;  $t$ -value = 2.33;  $p < 0.01$ ); thus, providing strong evidence supporting hypothesis two. This indicates that the adoption of quality management purchasing directly increases the level of internal customer satisfaction.

The third hypothesis asserts that *purchasing performance has a positive direct impact on internal customer satisfaction*. According to the results shown in Figure 4, the path relating these two constructs was positive and significant (standardized  $\beta_1$  coefficient = 0.648;  $t$ -value = 6.842;  $p < 0.01$ ); thus, providing strong evidence supporting hypothesis three. This result indicates that when purchasing performance increases, the level of internal customer satisfaction is also expected to improve.

Therefore, this research provides strong support for all three of the hypotheses explored in this paper.



**Figure 4:** Results from the Structural Model Analysis

## Conclusion

This study is the first empirical research to test the relationship among quality management purchasing, purchasing performance, and internal customer satisfaction using a structural equation modeling, and fills a gap between theory and practice that had been previously overlooked in the literature. The analysis of a sample of 306 manufacturing firms was used to examine the research questions. In the process of addressing these questions, valid and reliable instruments were developed to measure the key constructs of the study, quality management purchasing, purchasing performance, and internal customer satisfaction. The research included a rigorous literature review and pre-test in a multiple case study to ensure content validity. The instruments were tested for convergent and discriminant validity. The results showed that the scales developed were valid and highly reliable for all manufacturing industries in the sample, which lends support to the claim that the instruments and results are generalizable across manufacturing industries.

The three initial hypotheses formulated were confirmed. An important finding was that the extent of adoption of quality management purchasing has a direct positive impact on purchasing performance. Therefore, it could be concluded that the implementation of the practices included in the constructs management commitment, cross-functional coordination, personnel management, supplier quality management, quality information, and benchmarking contribute to improve the quality of materials purchased, ensure on-time delivery from suppliers, meet material expending targets, and achieve inventory goals. Additionally, implementation of these practices directly improves internal customer satisfaction (the quality of the service the purchasing department provides to its internal customers), and indirectly through the mediated

impact on purchasing performance. By focusing on these relationships practitioners can better understand how quality management purchasing can influence the company's overall performance and benefit from it.

The study has a number of limitations, which give rise to a number of suggestions for future research. Our study was cross sectional and descriptive of a given sample at a given point of time. A more stringent test of the relationships between quality management purchasing, purchasing performance, and internal customer satisfaction requires a longitudinal study, or field experiment, which could gather information about quality management purchasing, purchasing performance, and internal customer satisfaction on an appropriate time span. Then the association between the variation of independent factors and the variation of performance could be further investigated. The use of a single key informant could be seen as a potential limitation of the study, and this study's findings should be confirmed in the future using information directly obtained from actual suppliers and internal customers. Future research could also expand the model in this study by including additional factors, such as, the introduction of information technologies in the purchasing department.

## **Appendix**

On a scale of 1 = strongly disagree to 5 = strongly agree, indicate your firm's position on each of the following performance indicators:

### **A.1. Purchasing Quality Management**

#### **A.1.1. Management commitment.**

##### **V1**

**Purchasing management communicates to purchasing employees that quality is the most important purchasing objective**

V2 Purchasing management is evaluated based on quality performance (materials purchased defects rate, degree of internal customer satisfaction, etc.)

V3 Quality is the most important criteria in the selection and evaluation of suppliers

#### **A.1.2. Cross-functional coordination.**

V4 Purchasing participates with Quality and/or Production in determining the specifications

V5 Purchasing collaborates with Production/manufacturing in solving production problems

V6 Purchasing participates in the new product development process

#### **A.1.3. Personnel management.**

V7 Purchasing employees enjoy a high degree of autonomy in their decisions

V8 Purchasing employees perceive a high degree of security in their job

V9 Purchasing employees participate in the solution of problems through suggestions, opinions, etc.

V10 There is a high emphasis on training for purchasing employees

V11 Purchasing employees participate in supplier selection teams

V12 The procedure for personnel reward and recognition is based on teamwork performance

#### **A.1.4. Supplier quality management.**

V13 Suppliers are certified ISO 9000

V14 We visit suppliers' factories to assess their facilities

V15 Suppliers are recognized and rewarded for materials quality improvement

V16 The company provides training to its suppliers

V17 We maintain relationships with a limited number of suppliers (3 or less for every purchased material)

V18 Purchasing has access to suppliers' internal information (production costs, level of quality, etc.)

V19 Purchasing collaborates with suppliers in improvement and development activities for new raw materials and parts

#### A.1.5. Quality information.

V20 We collect information (data) about quality performance (supplier's reject rate, degree of internal customer satisfaction, etc.)

V21 Purchasing is informed of quality performance evaluations

V22 Suppliers are informed about their level of performance (quality, delivery, cost, etc.)

#### A.1.6. Benchmarking.

V23 We search for info about prices and level of quality of purchases of other companies in our industry

V24 We analyze the purchasing process of other companies to improve our own purchasing process

V25 There is a formal procedure to compare our purchasing performance with the purchasing performance of other companies

### A.2. Purchasing Performance

V26 Most raw materials and parts received are in conformance with specifications

V27 All raw materials and parts arrive within the delivery date

V28 The quantity of materials purchased in inventory meets the company's quantity performance objective

V29 The materials target cost (standard cost or budgeted cost) is met

### A.3. Internal Customer Satisfaction

V30 We have received complaints from our customer departments because of our incapacity to provide the service promised (R)

V31 We have not received complaints from our customer departments because of deficiencies in the knowledge or courtesy of the purchasing staff

V32 Customer departments are satisfied with the speed with which we react to their requirements

V33 Customer departments are satisfied with the attention and dedication that purchasing show for their problems

\* (Tangibles) We have not received complaints from our customer departments because of the situation of our facilities, furniture, personnel appearance, etc. (R)

\* item dropped during validity and reliability analysis

R = reverse coded

## References

Ahire, S.L., Golhar, D., and Waller, M.A., "Development and validation of TQM implementation constructs," *Decision Sciences*, Vol. 27 No. 1 (1996), 23-56.

Anderson, J.C and Gerbing, D.W., "Structural equation modelling in practice: a review and recommended two-step approach," *Psychological Bulletin*, Vol. 103 No. 2 (1988), pp. 411-423.

Anderson, J.C., Rungtusanatham, M. and Schroeder, R.G., "A theory of quality management underlying the Deming management method," *Academy of Management Review*, Vol. 19 No. 3 (1994), 472-509.

Armstrong, J.S. and Overton, T.S., "Estimating nonresponse bias in mail surveys," *Journal of Marketing Research*, Vol. 14 No. 3 (1977), 396-402.

- Black, S.A. and Porter, L.J., "Identification of the critical factors of TQM," *Decision Sciences*, Vol. 27 No. 1 (1996), 1-21.
- Bollen, K.A. and Long, J.S., *Testing Structural Equation Models*, Newbury Park, CA: Sage Publications, 1993.
- Brookshaw, T. and Terziovski, M., "The relationship between strategic purchasing and customer satisfaction within a total quality management environment," *Benchmarking for Quality Management & Technology*, Vol. 4 No. 4 (1997), 244-258.
- Burt, D.N., "Managing product quality through strategic purchasing," *Sloan Management Review*, Vol. 30 No. 3 (1989), 39-48.
- Caddick, R.J. and Dale, B.G. (1998), "The impact of total quality management on the purchasing function: influences and implications," *European Journal of Purchasing and Supply Management*, Vol. 4 133-142.
- Camp, R.C. (1989), *Benchmarking: The Search for Industry Best Practices that Lead to Superior Performance*, ASQC Press, Milwaukee, WI.
- Carr, A.S. and Pearson, J.N., "Strategically managed buyer-supplier relationships and performance outcomes," *Journal of Operations Management*, Vol. 17 No 3 (1999), 497-519.
- Carr, A.S. and Smeltzer, L.R., "The relationship among purchasing benchmarking, strategic purchasing, firm performance, and firm size," *The Journal of Supply Chain Management*, fall (1999), 51-60.
- Carter, J.R. and Miller, J.G., "The impact of alternative vendor/buyer communication structures on the quality of purchased materials," *Decision Sciences*, Vol. 20, No 4 (1989), 759-776.
- Carter, J.R. and Narasimhan, R., "The role of purchasing and materials management in total quality management and customer satisfaction," *International Journal of Purchasing and Materials Management*, Vol. 30 No. 3 (1994), 2-13.
- Carter, J.R., Smeltzer, L. and Narasimhan, R., "The role of buyer and supplier relationships in integrating TQM through the supply chain," *European Journal of Purchasing and Supply Management*, Vol. 4 No. 4. (1998), 223-234.
- Carter, J.R., Smeltzer, L. and Narasimhan, R., "Human resource management within purchasing management: its relationship to Total Quality Management success," *The Journal of Supply Chain Management*, Vol. 36 No. 2 (2000), 52-62.
- Chao, C., Scheuing, E.E. and Ruch, W.A., "Purchasing performance evaluation: an investigation of different perspectives," *International Journal of Purchasing and Materials Management*, Vol. 29 No. 3 (1993), 33-39.
- Chau, P.Y.K., "Reexamining a model for evaluating information center success using a structural equation modelling approach," *Decision Sciences*, Vol. 28 No. 2 (1997), 309-334.
- Churchill, G.A. Jr., "A paradigm for developing better measures of marketing constructs," *Journal of Marketing Research*, Vol. 16 No. 1 (1979), 64-73.
- Cooper, M.C., Lambert, D.M. and Pagh, J.D., "Supply chain management: more than a new name for logistics," *International Journal of Logistics Management*, Vol. 8 No. 1 (1997), 1-13.

- Cronin, J.J. Jr. and Taylor, S.A., "SERVPERF versus SERVQUAL: reconciling performance-based and perceptions-minus-expectations measurement of service quality," *Journal of Marketing*, Vol. 58 No. 1 (1994), 125-131.
- Curkovic, S., Vickery, S., and Droge, C., "Quality-related elements: their impact on quality performance and firm performance," *Decision Sciences*, Vol. 31 No. 4 (2000), 885-905.
- Dean, J.W. Jr. and Bowen, D.E., "Management theory and total quality: improving research and practice through theory development," *Academy of Management Review*, Vol. 19 No. 3 (1994), 392-418.
- Dillman, D.A., *Mail and Telephone Surveys: The Total Design Method*, New York: John Wiley, 1978.
- Dyer, J.H., "Effective interfirm collaboration: how firms minimize transaction costs and maximize transaction value," *Strategic Management Journal*, Vol. 18 No. 7 (1997), 535-556.
- Dowlatshahi, S., "Implementing early supplier involvement: a conceptual framework," *International Journal of Operations and Production Management*, Vol. 18 No. 2 (1998), 143-167.
- Ellram, L.M. and Hendrick, T.E., "Partnering characteristics: a dyadic perspective," *Journal of Business Logistics*, Vol. 16 No 1 (1995), 41-64.
- Fawcett, S.E. and Fawcett, S.A., "The firm as a value-added system: integrating logistics, operations and purchasing," *International Journal of Physical Distribution & Logistics Management*, Vol. 25 No. 5 (1995), 24-42.
- Flynn, B.B., Sakakibara, S. and Schroeder, R.G., "A framework for quality management research and an associated measurement instrument," *Journal of Operations Management*, Vol. 11 No. 4 (1994), 339-366.
- Fornell, C. and Larcker, D.F., "Evaluating structural equation models with unobservable variables and measurement error," *Journal of Marketing Research*, Vol. 18 (1981), 39-50.
- Fynes, B. and Voss, C., "The moderating effect of buyer-supplier relationships on quality practices and performance," *International Journal of Operations and Production Management*, Vol. 22 No. 6 (2002), 589-613.
- Giunipero, L.C. and Brand, R.R., "Purchasing's role in supply chain management," *International Journal of Logistics Management*, Vol. 7 No. 1 (1996), 29-38.
- Giunipero, L.C. and Brewer, D.J., "Performance based evaluation systems under Total Quality Management," *International Journal of Purchasing and Materials Management*, Vol. 29 No. 1 (1993), 35-41.
- Giunipero, L.C. and Vogt, J.F., "Empowering the purchasing function: moving to team decisions," *International Journal of Purchasing and Materials Management*, Vol. 33 No. 1 (1997), 8-15.
- Hackman, R.J. and Wageman, R., "Total quality management: empirical, conceptual, and practical issues," *Administrative Science Quarterly*, Vol. 40 No. 2 (1995), 309-342.
- Hair, J.F. Jr., Anderson, R.E., Tatham, R.L. and Black, W.C., *Multivariate Data Analysis with Readings*, Englewood Cliffs, NJ: Prentice Hall, 1995.

- Jöreskog, K.G. and Sörbom, D., LISREL 8: Structural Equation Modelling with the SIMPLIS Command Language, Chicago, IL: Scientific Software International, 1993.
- Krause, D.R., "The antecedents of buying firms' efforts to improve suppliers," *Journal of Operations Management*, Vol. 17 No. 2 (1999), 205-224.
- Krause, D.R., Scannell, T.V. and Calantone, R.J., "A structural analysis of the effectiveness of buying firms' strategies to improve supplier performance," *Decision Sciences*, Vol. 31 No. 1 (2000), 33-55.
- Kuei, C., Madu, C. and Lin, C., "The relationship between supply chain quality management practices and organizational performance," *International Journal of Quality and Reliability Management*, Vol. 18 No.8 (2001), 864-872.
- Lambert, D.M., Cooper, M.C. and Pagh, J.D., "Supply chain management: implementation issues and research opportunities," *International Journal of Logistics Management*, Vol. 8 No. 1 (1998), 1-19.
- Lascelles, D.M. and Dale, B.G., "The buyer-supplier relationship in total quality management," *Journal of Purchasing and Materials Management*, Vol. 25 No. 2 (1989), 10-19.
- Lamming, R., *Beyond Partnership: Strategies for Innovation and Lean supply*, London: Prentice-Hall, 1993.
- Leenders M.R., Fearon H.E., Flynn, A.E., and Johnson, P.F., *Purchasing and supply management* Chicago, IL.: McGraw-Hill Irwin, 2002.
- Noordewier, T., George, J. and Nevin, J., "Performance outcomes of purchasing arrangements in industrial buyer-vendor relationships," *Journal of Marketing*, Vol. 54 No. 4 (1990), 80-93.
- Parasuraman, A., Zeithaml, V.A. and Berry, L.L., "A conceptual model of service quality and its implications for future research," *Journal of Marketing*, Vol. 49 No. 4 (1985), 41-50.
- Parasuraman, A., Zeithaml, V.A. and Berry, L.L., "SERVQUAL: a multiple-item scale for measuring consumer perceptions of service quality," *Journal of Retailing*, Vol. 64 No. 1 (1988), 12-40.
- Powell, T.C., "Total quality management as competitive advantage: a review and empirical study," *Strategic Management Journal*, Vol. 16 No. 1 (1995), 15-37.
- Romano, P. and Vinelli, A., "Quality management in a supply chain perspective," *International Journal of Operations and Production Management*, Vol. 21 No. 4 (2001), 446-460.
- Salvador, F., Forza, C., Rungtusanatham, M. and Choi, T.Y., "Supply chain interactions and time-related performances," *International Journal of Operations and Production Management*, Vol. 21 No. 4 (2001), 461-475.
- Saraph, J.V., Benson, P.B., and Schroeder, R.G., "An instrument for measuring the critical factors of quality management," *Decision Sciences*, Vol. 20 No. 4 (1989), 810-829.
- Segars, A.H. and Grover, V., "Re-examining perceived ease of use and usefulness: A confirmatory factor analysis," *MIS Quarterly*, Vol. 17 No. 4 (1993), 517-525.
- Stanley, L.L. and Wisner, J.D., "Internal service quality in purchasing: an empirical study," *International Journal of Purchasing and Materials Management*, Vol. 34 No. 3 (1998), 50-60.

Stanley, L.L. & Wisner, J.D., "Service quality along the supply chain: implications for purchasing," *Journal of Operations Management*, Vol. 19 No. 3 (2001), 287-306.

Stanley, L.L. and Wisner, J.D., "The determinants of service quality: issues for purchasing," *European Journal of Purchasing and Supply Management*, Vol. 8 No. 2 (2002), 97-109.

Stuart, F.I. and Mueller, P.J.R., "Total quality management and supplier partnerships: a case study," *International Journal of Purchasing and Materials Management*, Vol. 30 No. 1 (1994), 14-20.

Tan, K.C., Kannan, V.R., Handfield, R.B. and Ghosh, S., "Supply chain management: an empirical study of its impact on performance," *International Journal of Operations and Production Management*, Vol. 19 No. 10 (1999), 1034-1052.

Teas, R.K., "Expectations as a comparison standard in measuring service quality: an assessment of a reassessment," *Journal of Marketing*, Vol. 58 No. 1 (1994), 132-139.

Trent, R.J. and Monczka, R.M., "Achieving world-class supplier quality," *Total Quality Management*, Vol. 10 No. 6 (1999), 927-938.

Vonderembse, M.A. and Tracey M., "The impact of supplier selection criteria and supplier involvement on manufacturing performance," *The Journal of Supply Chain Management*, August (1999), 33-39.

Watts, C.A. and Hahn, C.K., "Supplier development programs: an empirical analysis," *International Journal of Purchasing and Materials Management*, April (1993), 11-17.

Wisner, J. and Stanley, L.L., "Internal relationships and activities associated with high levels of purchasing service quality," *The Journal of Supply Chain Management*, Vol. 35 No. 3 (1999), 25-31.

Youndt, M.A., Snell, S.A., Dean, J.W. and Lepak, D.P., "Human resource management in manufacturing strategy, and firm performance," *Academy of Management Journal*, Vol. 39 No. 4 (1996), 836-866.

Young, J.A. and Varble, D.L., "Purchasing's performance as seen by its internal customers: a study in a service organization," *International Journal of Purchasing and Materials Management*, Vol. 33 No. 3 (1997), 36-41.

## **LA DÉMARCHE DE LA QUALITÉ TOTALE DANS DES ENTREPRISES PARTENAIRES: ÉTUDE EXPLORATOIRE**

Facteur clé de la compétitivité, le «Total Quality Management» est une démarche qui vise une amélioration continue de la performance des organisations. Le succès de la démarche dépend de la capacité de l'entreprise à favoriser certains préalables et veiller à leur articulation. L'objet de ce travail de recherche est de dégager les principaux préalables au management de la qualité totale et de tester si l'environnement des entreprises partenaires est propice à une telle démarche.

### **Introduction**

Le «Total Quality Management» ou démarche de qualité totale constitue l'un des maillons de l'histoire de la qualité. C'est un système évolutif de pratiques, d'outils et de méthodes de formation pour la conduite des entreprises. Son but est, entre autres, de satisfaire le client dans un monde en évolution rapide. Cette démarche améliore la performance des entreprises, en particulier par l'élimination des défauts sur les produits par la conception de produits plus attrayants, la réduction des délais et des coûts et l'amélioration du service (Shiba *et al.*, 1997). Elle favorise en outre l'éclosion d'une réflexion nouvelle dépassant la logique de décision limitée aux traditionnelles dimensions financières ou techniques de l'entreprise en intégrant des données culturelles et en développant la variable humaine qui devient au centre des préoccupations des organisations.

Cette vision de la qualité marquée par des changements culturels importants suppose que l'entreprise confrontée aux nouvelles conditions de la croissance, est amenée à déplacer la recherche de la qualité par des actions individuelles vers une recherche collective, coordonnée et intégrée. L'option d'action collective permet aussi dans une optique de performance de détecter et d'activer des gisements de productivité interne et une meilleure capacité d'adaptation. La mobilisation de ces gisements nécessite des préalables qui jouent le rôle de catalyseur pour activer les éléments d'interfaçage intervenant dans l'évaluation de la qualité pour tendre vers une meilleure performance de l'organisation.

L'objectif d'amélioration continue de la performance se fait de plus en plus sentir dans un environnement ou un contexte international caractérisé par la mondialisation des échanges et par l'accroissement des coûts et de la complexité des technologies. En effet, les approches concurrentielles du management stratégique sont fondées sur l'idée que pour subsister face à ses concurrents, l'entreprise doit se doter d'avantages compétitifs spécifiques durables et défendables. Ces avantages peuvent provenir soit de volumes de production plus élevés, ce qui permet de réduire les coûts, soit de compétences et savoir-faire distinctifs, ce qui permet de mettre sur le marché des produits différenciés (Garrette et Dussauge, 1995). C'est pourquoi la coopération ou la création d'un réseau de partenariat s'impose dans certains cas pour permettre de partager les coûts et donc les risques et de combiner les compétences variées et complémentaires. Ces objectifs sont assurés par la mise en œuvre d'une démarche de qualité totale visant un niveau de qualité toujours meilleur, des coûts plus compétitifs et des délais raccourcis, comme le soulignent Garrette et Dussauge (1995) : « entretenir des relations de partenariats devient une arme

stratégique fondamentale pour accéder à l'ensemble des technologies nécessaires en assurant un prix et un niveau de qualité compétitifs».

L'objet de ce travail de recherche est de dégager des préalables à la démarche de la qualité totale et de vérifier s'ils sont capables de générer une dynamique favorisant une amélioration continue. On cherche ensuite à vérifier les hypothèses à travers les résultats d'une enquête menée en 2001 auprès d'entreprises partenaires. Il est à noter que la recherche n'a pour le moment qu'un caractère exploratoire qui révèle des tendances et des voies empruntées par les dirigeants d'entreprises dans le processus de management de la qualité. Ainsi, les conclusions émises s'apparentent plutôt à des esquisses valables pour avancer des hypothèses destinées à des recherches ultérieures.

### **Les préalables à la qualité totale**

La revue de la littérature managériale nous a permis de faire ressortir les principaux préalables à une démarche de qualité totale. Il s'agit : a) de la conception et de la mise en œuvre d'une stratégie qualité, b) de la priorité accordée à l'approche client, c) d'une structure organisationnelle caractérisée par l'assouplissement de la structure hiérarchique, la promotion de la collaboration, la communication et le travail en groupe, et d) la formation du personnel. Il est à noter que ces préalables ne fonctionnent pas indépendamment les uns des autres; leur articulation serait à la base du succès du management de la qualité totale.

### **L'élaboration d'une stratégie qualité**

Les qualitatifs s'accordent pour considérer la qualité totale comme étant une démarche organisationnelle de recherche de l'efficacité globale orientée vers la prospérité durable de l'entreprise (Weill, 1999). La logique sous-jacente de la démarche est que la qualité d'un produit ne peut être obtenue de façon durable qu'à travers une maîtrise de la qualité des processus qui ont contribué à sa fabrication. En effet, ce ne sont pas les produits et les marchés qui servent de clé de voûte dans la construction d'une stratégie mais le processus de fonctionnement dans l'entreprise. Le succès d'une entreprise dépend de la transformation réussie des processus clés d'une entreprise en compétences stratégiques, fournissant de manière permanente et cohérente une valeur supérieure au client (Stalk *et al.*, 1992). La gestion totale de la qualité ne peut donc être envisagée comme la juxtaposition de mécanismes techniques mais comme un ensemble de processus interconnectés réunis dans un plan d'ensemble en vue d'atteindre des objectifs déterminés (Collignon et Wissler, 1988). De ce fait, le «Total Quality Management» (TQM) est considéré comme une stratégie de management intégrée qui englobe toute l'entreprise aussi bien les activités que son personnel et son environnement, pour fixer et satisfaire les objectifs qualité déduits des exigences du client (Skorokhodoff, 1998). Cette stratégie qualité correspond au choix des outils à mettre en œuvre, aux règles pratiques de conduite à respecter, aux actions à mener conformes à la politique qualité, c'est-à-dire, visant à atteindre l'objectif en respectant les principes et en mettant en relief l'engagement de la direction dans cette voie (Bernillon et Cerutti, 1988). Il ne s'agit pas donc de concevoir une stratégie qualité indépendante de la stratégie générale de l'entreprise.

La définition de la stratégie et la vérification de sa pertinence apparaissent comme des préalables à toute action de gestion opérationnelle visant à mieux gérer la qualité. Sans projet d'entreprise clairement défini, le risque qu'une action soit interrompue en cours d'application sous la pression de contraintes d'environnement, en raison de son coût non prévu au départ ou encore du fait des effets limités vis-à-vis des objectifs poursuivis, est grand (Fahmi, 2000).

Donc, on ne réussira à faire des progrès dans la qualité que si toute l'entreprise a une vision d'ensemble des objectifs à atteindre. Ces objectifs sont déduits des exigences du client, ce qui permet de placer ce dernier dans une position charnière dans la démarche qualité.

## **La priorité accordée à l'approche client**

L'impératif de survie des entreprises a remodelé le comportement des dirigeants pour s'orienter davantage vers la garantie de la satisfaction et la fidélisation des clients. En effet, l'attitude du client est un facteur critique pour la réussite (Shiba *et al.*, 1997). Toutefois, le succès dépend de la capacité à introduire le client au plus profond du fonctionnement de l'entreprise non plus comme une contrainte qu'il faut subir mais comme une force sur laquelle on s'appuie (Lucas, 1995). L'ambition d'amélioration permanente de la qualité ne s'appuie plus seulement sur des réactions par secousses successives, inopinées, aléatoires dues aux réclamations des clients, mais sur la capacité de séduire les clients d'une part et d'investir dans le préventif d'autre part. Les résultats produits par l'entreprise seront alors générés par des processus d'interaction avec la clientèle et l'amélioration sera elle aussi orientée processus (Whiteley et Hessian, 1997).

Toutefois, l'approche client ne se limite pas à la relation de l'entreprise avec l'utilisateur final du produit dans le sens étroit, elle intègre, en outre, les différents partenaires et actionnaires de l'entreprise y compris la relation client-fournisseur interne tout au long de chaque processus mis en œuvre dans l'entreprise. Il convient donc de démanteler les barrières entre les services, afin de créer des conditions favorables à l'amélioration de la qualité. Il s'agit d'améliorer, non seulement, la qualité des produits livrés mais aussi la qualité des relations nouées entre le client et le fournisseur au sein de l'entreprise stimulant la collaboration, et contribuant à traiter efficacement les problèmes d'interfaçage. L'enjeu principal est donc de créer un réseau clairement défini de responsabilités, et d'introduire dans l'esprit de tous une même vision, celle du groupe afin de créer une culture unique. L'ancrage d'une telle culture est d'autant plus facilité qu'une structure organisationnelle adéquate, permettant d'articuler le système qualité et d'impliquer le personnel, est mise en œuvre au sein de l'entreprise.

## **La structure organisationnelle**

Le succès du management total de la qualité dépend dans une large mesure de la mise en œuvre d'un ensemble de démarches en matière de planification et de communication afin de coordonner les compétences au sein de l'organisation. Cette coordination est assurée par une structure organisationnelle adaptée au dialogue. Toutefois, organiser le TQM ne veut pas dire créer une section ou une division de contrôle mais plutôt créer un réseau de communication permettant une transmission rapide et exacte d'informations vitales pour assurer la qualité.

Si la qualité totale est perçue comme un mode de gestion centré sur la confiance généralisée à l'ensemble des relations intra et inter-entreprises, elle impliquerait alors l'existence d'un cadre organisationnel participatif favorisant le développement de contrats de confiance entre tous les individus (Blondel, 1999). On déduit que, peu compatible avec des structures fortement hiérarchisées et pyramidales, la qualité totale débouche sur des modèles d'organisation transversaux caractérisés par un assouplissement de la structure hiérarchique, la mobilisation, la participation, la communication et l'adhésion du personnel. Ce nouveau mode relationnel au sein de l'entreprise ne peut tendre vers une amélioration continue que s'il part d'un engagement de la direction et d'une mobilisation de tout le personnel.

Le développement d'un réseau de communication organisé dans l'entreprise constitue une ressource stratégique et vise trois objectifs: a) impliquer et sensibiliser le personnel aux enjeux de l'entreprise, b) créer une identité d'entreprise, une culture commune, et c) construire un esprit d'équipe et renforcer la cohésion (Skorokhodoff, 1998). Il s'agit non seulement de favoriser la circulation de l'information ascendante, descendante et latérale sans retard pour une exploitation rapide et efficace, mais aussi d'impliquer le personnel dans le but d'une meilleure transparence et un meilleur fonctionnement de l'organisation.

En outre, le développement d'un réseau organisé de communication inter-entreprise permet une flexibilité organisationnelle, incite au travail en groupe et promeut le management participatif (Santos, 2000). Ces changements radicaux, dans les pratiques de gestion, induits par la démarche de la qualité totale (nouvelle conception du travail et de l'organisation, redéfinition des rôles managériaux, réorientation des objectifs) nécessitent un apprentissage et une formation à une nouvelle culture dans l'entreprise.

### **La formation du personnel**

L'intégration des préoccupations qualitatives dans un cadre cohérent de gestion, aux plans opérationnel et stratégique est favorisée par une formation continue à la qualité dispensée à tous les membres de l'entreprise. Le but de la formation est moins de fournir des connaissances théoriques que d'encourager les membres de l'organisation à rechercher comment les appliquer en mettant l'accent sur les talents de la communication, de la coopération et du travail en groupe (Mizuno, 1990). La formation permet de persuader les dirigeants de faire de la qualité un des objectifs essentiels de l'entreprise dans le processus de prise de décision. Elle favorise l'amélioration continue de la qualité en identifiant toujours où résident les nouveautés et en maîtrisant les outils de prévention (pour éviter les anomalies avant leur apparition tels que la méthode TAGUCHI ou l'AMDEC (Lyonnet, 1991) et les outils statistiques (pour résoudre les problèmes relatifs à la qualité tels que les graphiques de contrôle, les histogrammes, les diagrammes cause-effet (Akrimi et Drira, 1999). Afin d'atteindre ces objectifs, le programme de formation associant l'apprentissage et la valorisation des compétences à la résolution des problèmes devrait trouver sa place dans les processus clés de l'entreprise et être intégré dans la politique qualité.

Tels sont des préalables proposés pour une démarche de qualité totale. Toutefois, il est à noter que leur mise en œuvre conditionne le succès d'une telle démarche et exclut toute rigidité dans leur combinaison. La flexibilité dans la manière de combiner les préalables dépend de l'identité de l'entreprise, de son mode de fonctionnement, de l'ampleur qu'elle accorde à chacun des préalables et des efforts fournis pour les déployer.

Par ailleurs, ce processus itératif et échelonné crée une dynamique qui tend vers une amélioration permanente de la qualité. Cette dynamique est assurée par la création d'une interface d'évaluation de la qualité basée sur des indicateurs de mesure de la qualité et où les préalables sont en mesure d'activer les éléments de cette interface.

### **Création d'une interface d'évaluation de la qualité**

Si on admet que la qualité totale est une démarche globale par laquelle l'entreprise met tout en œuvre pour satisfaire ses clients en qualité, en coût et en délai, alors cette démarche met l'accent sur les processus et cherche à comprendre le comment et le pourquoi (Sussland, 1994). Toutefois, la maîtrise et l'amélioration sont toujours le résultat de décisions appuyées sur des données mesurées, évaluées ou estimées. En revanche, l'absence de mesure empêche d'évaluer les progrès réalisés, de connaître les défaillances pour prendre les actions correctives qui s'imposent et d'identifier le chemin qui reste à parcourir pour atteindre l'objectif (Douchy, 1990).

Le recours à l'évaluation de la qualité n'est pas nouveau, mais ce sont les outils de mesure qui ne cessent d'évoluer en fonction de l'évolution de la perception de la qualité. Les premiers outils de mesure de la qualité se sont focalisés autour de la fiabilité et de la conformité du produit par rapport aux spécifications; ensuite, on est passé à des moyens de contrôle des systèmes et des procédures aux différents stades de la fabrication. Les qualitatifs comme Schewart, Deming et Juran ont mis en place des procédures statistiques de mesure et de contrôle de la qualité comme le «Statistical Process Control» en s'attaquant beaucoup plus à la performance du procédé plutôt

qu'au produit et en tenant compte de la contrainte du coût des tâches de vérification (Angell et Jeya Chandra, 2001).

Plus tard, l'extension des champs d'application a favorisé le développement de nouvelles méthodes qui ont dépassé le contrôle du processus pour s'étendre à toutes les activités en amont de la production et s'intéresser à tous les aspects qui touchent le produit dès sa conception (Sigot, 1999).

L'accès à des données réelles et validées par le contrôle des dispersions pendant la production en temps réel et sur la ligne de production permet de détecter les dysfonctionnements structurels et chroniques. D'où l'intérêt de disposer d'outils d'évaluation des différentes activités qui permettent de prévenir les dysfonctionnements dès la conception du produit et du procédé. Parmi ces outils, on peut citer l'AMDEC, la méthode TAGUCHI.

La garantie de la maîtrise des processus a conduit à un ensemble de réflexions sur l'évaluation de la conformité par rapport à des cahiers de charge pour faire naître ensuite des référentiels normatifs telles que les normes "ISO 9000" en vigueur depuis les années 1990. Les normes se concentrent sur la maîtrise d'activités par des procédures, par des contrôles, par la documentation de ce qui est planifié et exécuté. Cette maîtrise est couronnée par la certification "ISO 9000" qui représente une reconnaissance extérieure à l'entreprise permettant d'évaluer la manière et les mesures prises pour obtenir la qualité des produits et des services et jouir de la satisfaction des clients.

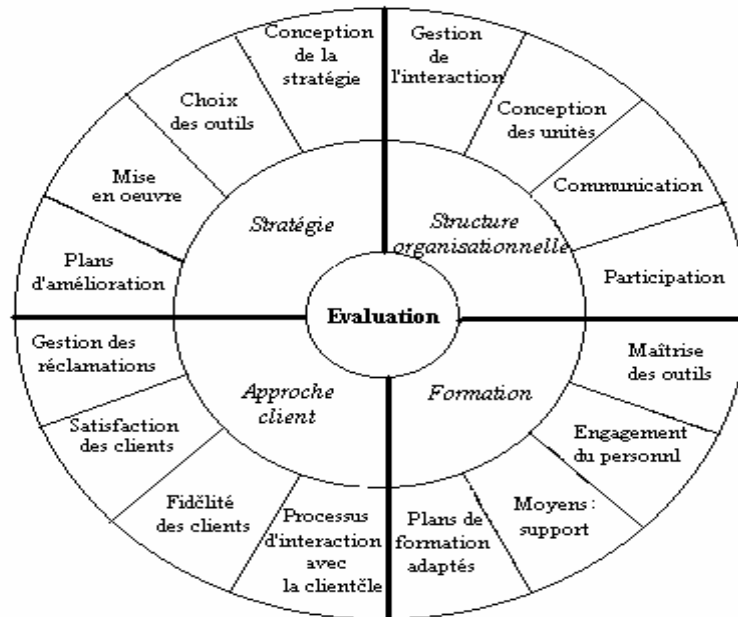
Néanmoins, le fait de voir dans la qualité une conformité, le respect des normes définies, est une vision réactive. Les procédures risquent de faire de la conformité à la norme le but ultime de l'entreprise au lieu de lui permettre de viser une amélioration continue de la qualité (Segrestin, 1997). Si l'entreprise met trop l'accent sur les aspects formels tels que l'établissement et la documentation des procédés, ces pratiques peuvent être encombrantes et perçues comme une initiative étouffante et inhibitrice d'une amélioration (Singels *et al.*, 2001). Il serait intéressant, pour évaluer la qualité, de s'orienter vers une optique plus ouverte dédiée à une gestion d'interfaces, éléments de syntaxe supposés évolutifs capables de tenir compte d'innovations techniques diversifiées et non prédéterminées. En effet, de part ses caractéristiques et ses préalables, la démarche qualité totale contribue à porter l'attention sur les stratégies finalisées de l'entreprise et à les réviser d'une façon critique sachant que les résultats produits par l'entreprise sont générés par des processus.

Cette optique suppose de partir, pour définir les objectifs et les stratégies, de la détermination des clients et de leurs exigences tout en se basant sur une interface d'évaluation de l'aptitude des processus de l'entreprise à les satisfaire. Cette interface suscite une évaluation à tous les niveaux de la réalisation. Il s'agit de valider les objectifs du plan stratégique en vérifiant la faisabilité au regard des capacités existantes et en proposant si nécessaire, une augmentation de ces capacités formalisée ensuite dans un plan d'amélioration qui devient partie intégrante de la stratégie globale de l'entreprise. Cette interface permet donc à l'entreprise de préparer les améliorations et les adaptations nécessaires de ses capacités d'intégrer les processus dans la planification stratégique; ce qui exige le recours aux préalables de la qualité totale qui se réalisent en épisodes induisant une amélioration continue de la qualité.

Ainsi, la réussite s'appuie sur une philosophie unique avec des modèles différents et une liberté d'imaginer dans différentes unités. Il se crée alors une dynamique basée sur la volonté de faire et la cohérence dans l'action et surtout sur une communication à travers un langage commun entre les différents partenaires de l'entreprise. Une telle dynamique serait en mesure d'appeler des actions que ni le système normatif, ni même l'enjeu de la qualité ne saurait enserrer ou prédéfinir.

Par ailleurs, les éléments de l'interface peuvent référer à des variables qualitatives et quantitatives. En effet, la mesure peut s'opérer suivant différents axes: a) l'établissement

d'indicateurs associés à la planification stratégique de la qualité. Parmi ces indicateurs, le coût de la qualité permet de prendre conscience de l'incidence financière des dysfonctionnements constatés et d'attirer l'attention du management sur le niveau des non conformités (Courtier et Vaucelle, 1990); b) l'extension des mesures de la qualité vers les différentes fonctions de l'entreprise (marketing, administration, service après vente); c) la création de moyens d'évaluation des performances qualité de l'encadrement et l'introduction de ces évaluations dans le système de reconnaissance des mérites; d) l'évaluation de la satisfaction du client à travers les indices d'insatisfaction et des taux de réponses favorables ou défavorables et les réclamations.



**Interface d'évaluation de la qualité**

## **La démarche qualité totale dans les entreprises partenaires**

### **Les caractéristiques de l'échantillon**

L'identification des entreprises partenaires a été faite sur la base d'un recoupement des informations relatives aux entreprises partenaires dans la base de données de l'API, des contacts entrepris avec les chambres de commerce tuniso-française, et tuniso-allemande. On a établi un échantillon de 110 entreprises dont uniquement 10 ont accepté de participer à l'enquête. Il est à noter qu'un taux de réponses relativement faible (environ 10%) rend difficile de tirer des conclusions significatives quant à la démarche de la qualité totale dans les entreprises partenaires. Toutefois, cela permettrait d'esquisser leurs perspectives d'adaptation aux exigences du nouveau contexte des entreprises.

Il convient de souligner que l'enquête s'est basée sur un questionnaire adressé au responsable de la qualité de chaque entreprise. Le questionnaire s'est articulé autour de cinq axes mettant l'accent d'une part, sur les préalables à la qualité totale, à savoir : a) la priorité accordée au client, b) l'élaboration d'une stratégie qualité, c) les caractéristiques de la structure organisationnelle, et d) la formation dispensée; et d'autre part, sur l'évaluation de la qualité.

Par ailleurs, les caractéristiques suivantes dénotent le profil des entreprises enquêtées :

- Elles sont réparties sur différentes régions de la Tunisie et couvrant cinq branches industrielles différentes : construction mécanique (deux entreprises), textile, confection et

- habillement (cinq entreprises), cuir et chaussures (une entreprise), électronique (une entreprise), teinturerie (une entreprise).
- b) Toutes les entreprises ont été créées il y a plus de 10 ans ; leurs effectifs varient de 50 à 200 employés dont 5 entreprises ont un effectif inférieur à 100.
  - c) Les partenaires étrangers sont de nationalités différentes : française (six cas), italienne (deux cas), turque (un seul cas) et allemande (un cas).
  - d) La participation tunisienne au capital représente une majorité puisque dans huit cas, elle dépasse 50%.

## **Les résultats empiriques**

### **La structure organisationnelle**

Afin de dégager les caractéristiques de la structure organisationnelle, l'accent est mis sur la place du service qualité dans l'organisation, le rôle du partenaire dans cette mise en place, le profil et le rôle du responsable qualité.

**La place du service qualité dans l'organisation:** Toutes les entreprises enquêtées disposent d'un service qualité. L'âge de ce service ne dépasse pas 10 ans dans 8 cas, ce qui marque une phase d'éveil à la démarche qualité en Tunisie à travers le besoin de certification qui se fait sentir depuis et qui nécessite une structure définie. Le service qualité dépend de la direction générale dans 4 entreprises, de la direction production dans 5 entreprises. Il est considéré comme étant un service autonome en relation avec toutes les autres fonctions dans un cas. Ceci dénote le début d'ancrage de la qualité dans l'esprit des dirigeants tout en étant dépendante du service production. Le rôle du partenaire dans la mise en place du service qualité diffère d'une entreprise à l'autre : 4 entreprises ont sous-estimé totalement le rôle du partenaire. Le partenaire intervient pour former le responsable de la qualité (1 cas), pour contrôler rarement la qualité des produits (2 cas), pour fournir du matériel au laboratoire (1 cas), pour consulter et conseiller (1 cas) et pour une assistance technique (1 cas).

**Le profil du responsable qualité:** L'intérêt porté à la qualité est aussi démontré par la qualification des responsables de la qualité qui sont tous des ingénieurs, l'un jouissant d'une expérience professionnelle de 12 ans et l'autre étant formé à l'étranger (maison mère), un gestionnaire ayant une expérience professionnelle de 4 ans et 3 sont des techniciens supérieurs dont un a une expérience professionnelle de 23 ans. Parmi les 4 responsables ayant négligé d'identifier leur niveau de formation, 3 ont été formés en Tunisie et à l'étranger et un est lui-même le directeur de l'usine.

**Le rôle du responsable qualité:** Les résultats de l'enquête font ressortir les principales fonctions du responsable qualité. Il veille tout d'abord à l'ancrage d'un état d'esprit qualité au sein de l'entreprise, en mettant l'accent sur le mode de travail en groupe, la communication sur la qualité et à la réalisation d'un programme de sensibilisation à la question. Le second rôle joué par le responsable qualité est de concevoir un plan qualité qui l'aiderait à l'élaboration de la stratégie qualité. Ce faisant, il intervient aussi pour auditer les différents services et les conseiller quant aux procédures élaborées et mises en œuvre au sein de l'entreprise. Aussi, le responsable de la qualité est considéré comme le maître d'œuvre de la mise en place des programmes de formation à la qualité à tous les niveaux (quatre entreprises parmi les dix enquêtées).

L'examen de la structure organisationnelle des entreprises partenaires montre que la structure fonctionnelle persiste au niveau de ces entreprises. Une telle structure de par ses

caractéristiques, répond à un souci de réduction de l'incertitude et de stabilité plutôt qu'à un souci de flexibilité et de rapprochement de l'entreprise du client. Elle risque de générer des difficultés de coordination et par conséquent une réduction de la maîtrise de la complexité interne de l'entreprise, ce qui freine le développement de la démarche qualité.

Le comportement des entreprises partenaires s'explique par la prédominance d'un «management tunisien» où la culture qualité totale reste embryonnaire axée beaucoup plus sur des approches procédurières. Cette orientation met en cause le rôle négligeable du partenaire étranger orienté plus vers une assistance technique et qui intervient en tant que consultant ou conseiller.

### **La stratégie mise en œuvre**

Il semble a priori que les résultats des efforts menés par les responsables de la qualité se font sentir puisque 8 entreprises parmi les 10 enquêtées prétendent être engagées dans une politique d'amélioration de la qualité; il est à signaler que les contrats de vente signés comprennent des clauses relatives à la qualité. L'enquête révèle que 3 objectifs fondamentaux sont visés par ces entreprises, au même niveau de priorité : il s'agit de l'amélioration de la qualité, du respect des délais et de la réduction des coûts. Ces objectifs sont fixés par la direction dans 8 cas, le partenaire n'y participe que dans deux cas.

L'engagement à la réalisation de ces objectifs qui sont d'ailleurs complémentaires, s'insère dans la logique d'amélioration continue de la qualité que Douhy (1990) propose et appelle «la trilogie de la qualité», parce que la satisfaction du client va au delà de la conformité du produit aux exigences; il s'agit d'offrir les produits à temps avec des prix compétitifs.

De telles mesures sont aussi capables de consolider les relations de partenariats, lesquelles relations recherchent une réduction de l'incertitude à travers le niveau de plus en plus satisfaisant de la qualité des produits, leur fiabilité, les délais de livraison de plus en plus raccourcis et les coûts compétitifs.

Il est à noter que les objectifs assignés par les entreprises partenaires convergent avec ceux visés par les entreprises tunisiennes (Kammoun, 1996) où les produits fabriqués sont destinés au marché local et étranger, ce qui dénote que le consommateur tunisien devient aussi exigeant de point de vue qualité, délai et prix que le consommateur étranger.

Par ailleurs, l'examen des actions engagées par les entreprises partenaires pour améliorer la qualité de leurs produits révèle deux tendances qui caractérisent leur démarche qualité:

- a) une tendance « technique » qui correspond à une vision techniciste ou procédurière de la qualité (axée sur les outils et la certification essentiellement) puisque parmi les dix entreprises enquêtées, trois sont certifiées selon les normes ISO 9000 (au moment du recueil des données, l'ancienne version des normes ISO 9000 était encore en vigueur), une entreprise fabrique un produit certifié AFNOR et deux autres ont des produits certifiés NT.
- b) une tendance «client» qui considère ce dernier comme juge de la qualité et place sa satisfaction comme objectif central de la qualité (cet objectif est à la base de la performance financière. Il dépend non seulement de la capacité d'une entreprise à offrir un produit de qualité mais surtout de la capacité de l'entreprise elle-même à générer la qualité dans les informations, les relations internes et les relations externes).

D'ailleurs, sous prétexte de la satisfaction totale de leurs clients, trois entreprises parmi les dix enquêtées se limitent à suivre les normes dictées par les clients.

On constate donc que, malgré la prédominance de la tendance technique et procédurière, la tendance «client» est marquée chez les entreprises partenaires. Ce constat permet de déduire

que les relations de partenariat semblent consolider les rapports avec les clients et améliorer les interfaces entre clients et fournisseurs; ce qui favorise davantage la satisfaction du client et sa fidélisation et en conséquence augmente le volume de la production et réduit les coûts. Toutefois, si on a pu détecter deux tendances de la démarche qualité (technique et client) en vigueur au niveau des entreprises enquêtées, on peut constater que la tendance «processus» qui constitue une clé de voûte dans la construction d'une stratégie de management total de la qualité, se trouve négligée ou marginalisée ; ce qui constitue une déperdition de la qualité.

En effet, les entreprises qui s'orientent vers la tendance «processus» ont une démarche qualité construite sur un management participatif axé sur:

- a) le développement d'un réseau de communication intra et inter entreprises qui permet de disposer d'une flexibilité organisationnelle et stratégique induisant un changement de la culture d'entreprise ;
- b) la mobilisation du travail en équipe et la coopération ;
- c) le développement d'un système de prévention et non de contrôle afin de créer la qualité le plus en amont et veiller à son amélioration continue.

L'enquête montre qu'une vision globale du système d'entreprise, du réseau complexe des partenaires (internes à l'entreprise ou étranger), de leurs rôles et des façons d'en maximiser la contribution de les motiver, fait défaut.

Les pratiques actuelles des entreprises partenaires s'orientent peu vers le travail en équipe (même si quatre entreprises ont instauré récemment des cercles de qualité) parce qu'on n'assiste ni à une cohésion, ou une implication du personnel, ni même à une maîtrise ou utilisation des outils de prévention : on met l'accent sur les contrôles répétitifs à chaque étape du processus (9/10 entreprises font à la fois le contrôle à la réception, en cours de fabrication et au stade final) sans s'orienter suffisamment vers l'auto-contrôle qui permet de responsabiliser davantage le personnel. Il est à noter que l'intervention du partenaire est négligeable dans la proposition des méthodes de contrôle (un seul cas).

### **Les actions de formation**

Tous les responsables de la qualité enquêtés éprouvent un besoin pour la formation dispensée au personnel de l'entreprise quelque soit la position hiérarchique. Des actions de formation sont entreprises mais qui diffèrent d'une entreprise à l'autre :

- a) un cas d'entreprise où la direction de l'entreprise s'engage à assurer la même formation à tout le personnel de tous les services;
- b) un cas où c'est le responsable de la qualité qui assure la formation à la direction, aux cadres du service production et aux cadres du service maintenance;
- c) trois cas où la formation est assurée par un expert externe délégué par le partenaire. Les bénéficiaires de cette formation sont les cadres et les non cadres du service production (dans deux entreprises) et le personnel du service contrôle (une entreprise);
- d) une autre entreprise se contente de former le personnel des services production, maintenance et commercial à travers la participation à des séminaires externes.

Toutefois, une entreprise spécialisée dans la fabrication de matériaux de construction et dont le partenaire est français, met l'accent sur un programme de formation relativement distingué par rapport aux autres. En effet, le partenaire délègue un expert externe pour assurer la formation du personnel des services production, maintenance, commercial et administratif. En outre, le directeur de la qualité, assure une formation à tous les services.

Des séminaires internes sont organisés, en bénéficient les services production, maintenance et commercial. La direction de l'entreprise, et les services production, maintenance et administratif ont souvent l'occasion de participer à des séminaires externes à l'entreprise.

Cette divergence d'actions de formation s'explique par le manque d'une vision globale des chefs qui permet de construire un noyau autour duquel se greffent les actions de formation. Il s'agit de définir l'objectif de la formation pour pouvoir engager les pratiques et surtout détenir qui est responsable de la formation, et à qui elle est dispensée. Il semble que ni les objectifs, ni les thèmes de la formation ne sont définis clairement, puisque le contenu de la formation est orienté essentiellement vers une initiation aux concepts de la qualité sans qu'il n'y ait de maîtrise ni des outils statistiques, ni ceux de prévention qui ne sont d'ailleurs pas assimilés par le personnel. Cette réticence à l'utilisation de ces outils freine l'initiative et la créativité chez le personnel et s'explique entre autres par le retard de l'ancrage d'une nouvelle culture véhiculée par une modification des comportements au niveau de ces entreprises.

### **L'évaluation de la qualité**

L'enquête montre que les responsables sont convaincus de la nécessité d'évaluer les mesures prises en matières de qualité. En effet, 9 entreprises sur les 10 enquêtées s'engagent dans une action d'évaluation globale de la qualité. Les critères d'évaluation retenus sont classés par ordre de priorité comme suit : 1) la fréquence d'apparition des défauts (cité par 8 entreprises), 2) les réclamations des clients (7 réponses), 3) le coût de la qualité (6 réponses), 4) les taux de rebuts (4 réponses), 5) le temps passé en réparation (4 réponses), et 6) le temps passé en contrôle (3 entreprises).

On remarque donc que le critère essentiel retenu pour évaluer la qualité, est la fréquence d'apparition des défauts qui est assimilée dans l'esprit des dirigeants à une non conformité aux normes. Les actions entreprises en cas de non conformité aux normes diffèrent selon l'étape du processus de fabrication:

- a) à la réception de la matière premières, trois entreprises affirment qu'elles acceptent le produit, dont une entreprise avise le partenaire qui réclame lui même au fournisseur et négocie le prix. Les sept entreprises font retourner le produit aux fournisseurs et ne tolèrent pas son utilisation.
- b) En cours de fabrication : 8 entreprises rejettent automatiquement les produits non conformes et arrêtent la production pour corriger, les deux autres entreprises se proposent de corriger les anomalies en cours du processus.
- c) Au niveau du produit fini : Si le contrôle final dégage des non conformités aux normes, cinq entreprises affirment qu'elles rejettent le produit dont une entreprise arrête la production pour rechercher les causes de la non conformité aux normes ; les cinq autres entreprises déclassent les produits non conformes en deuxième choix avec un prix inférieur.

A partir de ces résultats, il semble que les responsables sont exigeants quant au niveau de qualité et ne se permettent pas de livrer des produits non conformes aux normes, vu les clauses contractuelles et la certification des produits (six cas). Par ailleurs, parmi les dix entreprises enquêtées, sept entreprises tendent vers l'évaluation des dysfonctionnements dus à la non qualité et ce : a) en évaluant la fréquence des défauts (un cas), b) en évaluant la fréquence des défauts et en détectant les causes (un cas), c) en évaluant la fréquence des défauts en calculant les taux de déchets et en détectant les causes (deux cas) d) en évaluant la fréquence des défauts, en calculant les taux de déchets, en détectant les causes et en évaluant le coût des anomalies (trois cas). Cette évaluation est faite par les personnes suivantes : a) le responsable de la qualité (un cas), b) les cadres supérieurs et les cadres moyens tunisiens en faisant participer les ouvriers (trois cas), c) les cadres supérieurs et les cadres moyens tunisiens plus les cadres supérieurs des partenaires (un cas), et d) les cadres supérieurs tunisiens seuls (deux cas).

La détection des anomalies permet de s'engager dans un processus de correction en s'attaquant aux causes pour favoriser davantage une prévention; tel est le cas de 6 entreprises qui affirment être engagées dans des actions préventives, qui consistent généralement à : a) mettre l'accent sur la formation du personnel, en explicitant les méthodes de production; b) changer de

fournisseur si la matière première n'est pas conforme; c) informer les techniciens supérieurs, les ingénieurs de la production, les contrôleurs de la qualité et tous ceux qui sont concernés pour faire le suivi et intervenir en amont.

Malgré cette tendance vers une démarche de prévention des défauts, les outils de prévention restent non assimilés par tout le personnel. Un autre point fondamental dans l'évaluation de la qualité pourrait être retenu, il s'agit de l'estimation de certains coûts qui sont des éléments pour l'évaluation du coût de la qualité. Ce critère étant retenu par certaines entreprises avec des degrés d'évaluation différents. Le tableau suivant récapitule ces résultats.

**Tableau 1 : Evaluation des éléments du coût de la qualité**

| <b>Estimation</b>                                                   | <b>Global<br/>e</b> | <b>Détaillée</b> | <b>Aucun<br/>e</b> | <b>Total</b> |
|---------------------------------------------------------------------|---------------------|------------------|--------------------|--------------|
| du coût de réparation des produits                                  | 2                   | 5                | 3                  | 10           |
| du coût de mise au rebut du produit                                 | 2                   | 4                | 4                  | 10           |
| du coût d'investissement en matériel de prévention                  | 2                   | 3                | 5                  | 10           |
| du coût d'investissement en matériel pour le contrôle de la qualité | 2                   | 5                | 3                  | 10           |
| des dépenses d'investissement en formation pour la prévention       | 2                   | 3                | 5                  | 10           |
| du manque à gagner dû à la non qualité                              | 5                   | 1                | 4                  | 10           |

Ces résultats révèlent une tendance soit vers l'absence d'estimation soit vers une estimation détaillée de certains coûts qui constituent le coût de la qualité. Cette estimation permet à sept entreprises d'initier des programmes de réduction des coûts. Toutefois le rôle du partenaire dans l'élaboration de cette action reste toujours négligeable, puisqu'il n'intervient que dans deux cas en tant que simple consultant ou pour une action de sensibilisation, et pour les cinq autres entreprises, le partenaire ne joue aucun rôle. Ce résultat prouve que le management reste teinté "tunisien" puisque le rôle du partenaire est négligeable.

Toutefois, la tendance vers l'évaluation de la qualité à travers une maîtrise des coûts favorise une stratégie de recherche de la qualité par la compétitivité des coûts tout en essayant de réduire les dysfonctionnements pour un meilleur niveau de qualité et donc une meilleure satisfaction du client.

Il semble que la tendance vers l'évaluation de la qualité à travers les critères sus mentionnés (fréquence des défauts, taux des déchets, taux de rebuts, coût de la qualité, satisfaction du client) suppose l'existence de quelques éléments d'interfaçage qui restent insuffisants pour générer une dynamique totale du processus d'amélioration de la qualité. Cela tient à ce que les préalables à la qualité totale qui sont nécessaires pour activer les éléments d'interfaçage ne sont pas suffisamment développés. En effet, la stratégie qualité reste peu développée et non intégrée dans la stratégie globale de l'entreprise. Elle n'est pas révisée pour permettre un changement de la structure organisationnelle. Cette dernière s'apparente plutôt à une structure fonctionnelle peu compatible avec le management participatif. Par ailleurs, les actions de formation entreprises semblent être formelles sans impact puisqu'elles sont incapables de générer un changement de la culture d'entreprise.

## **Conclusion**

Partant de cette étude exploratoire, il est à préciser que vu la taille réduite de l'échantillon, il est difficile de dégager des conclusions ou des pratiques généralisées à l'ensemble

des entreprises partenaires. Toutefois, on peut relever certaines caractéristiques du management de la qualité totale qui pourront être vérifiées à travers un échantillon plus grand. Il y a lieu de relever que malgré une prise de conscience chez les responsables de l'importance à accorder à la qualité en considérant la satisfaction du client comme objectif central, des insuffisances persistent au niveau des pratiques de gestion. Il est à noter que toutes les pratiques engagées en matière de qualité reflètent « un management tunisien » et ne sont aucunement teintées par une culture étrangère, celle du partenaire. La démarche qualité semble être séparée en deux niveaux, un premier qui vise à déterminer des procédures strictes sur les rôles, les objectifs et qui renvoie à la recherche d'assurance de la qualité ou des normes ISO9000 d'où la certification, et un second niveau qui est centré sur le client dont la satisfaction est considérée comme l'objectif central de la démarche. Toutefois cette démarche qualité semble peu intégrée dans les processus organisationnel et stratégique. Elle est incapable d'induire des changements ni dans les structures (qui s'apparentent à des structures plutôt fonctionnelles), ni dans les comportements (qui sont caractérisés par l'absence du travail en équipe, de la coopération, et de la communication).

Bien que les entreprises entreprennent des actions de formation, les résultats restent limités puisqu'elles ne touchent pas tout le personnel de la même manière. Les méthodes de prévention qui constituent le pilier de l'amélioration ne sont pas maîtrisées. Les actions de formation sont donc sporadiques, formelles et sans impact. Ce manque d'articulation entre les différents préalables à la qualité totale ne peut activer tous éléments d'interfaçage pour l'évaluation de la qualité; ce qui ralentit la dynamique du processus d'amélioration continue de la qualité.

### Références

Akrimi, A. et J. Drira, *Maîtriser la qualité totale, Méthodes et outils*, Editions Art Print, Tunis, 1999.

Angell, L.-C. and M. Jeya Chandra, « Performance Implications of Investments Continuous Quality Improvement », *International Journal of Operations and Production Management*, Vol. 21, N°1, 2001 (108-125).

Bernillon, A. et O. Cerutti, *Implanter et gérer la qualité totale*, Les Editions d'Organisation, 1988.  
Blondel, F.G., « La qualité à l'interface des démarches participatives et de la performance globale », *Revue Française de Gestion Industrielle*, Vol. 18, No. 9, 1999 (21-34).

Clermont, B., *Introduction à la qualité totale en éducation*, Les Editions transcontinentales, Paris, 1995.

Collignon, E. et M. Wissler, *Qualité et compétitivité des entreprises*, Economica, Paris, 1988.

Courtier, J.C et B. Vaucelle, « La normalisation un outil pour construire la qualité », dans Laboucheix, « *Traité de la qualité totale* », Paris, 1990 (225-236).

Douchy, J.M., *Vers le zéro défaut*, Dunod, Paris, 1990.

Dumortier, J.F., « Les stratégies de mise en œuvre », dans Laboucheix, « *Traité de la qualité totale* », Paris, 1990 (325-335).

Fahmi, Y., « Contribution à une théorie de la gestion de la qualité totale, les déterminants de l'adoption », IXème conférence internationale de management stratégique, mai, AIMS, 2000 (1-21).

Garrette, B. et P. Dussange, *Les stratégies d'alliance*, Les Editions d'Organisation, Paris, 1995.

Kammoun, R., «Peut-on parler d'une démarche qualité totale dans les entreprises tunisiennes?», *Gestion des entreprises, Contextes et Performance*, Centre de publication universitaire, 1998, (93-119).

Lucas, F., *La qualité totale*, Vetter Editions, Nanterre Cedex, 1995.

Lyonnet, P., *Les outils de la qualité totale*, Technique et Documentation (Lavoisier), Paris Cedex, 1991.

Mizuno, S., *La maîtrise pleine et entière de la qualité*, Economica, Paris, 1990.

Santos, F., «Integration of Human Resource Management and Competitive Priorities of Manufacturing Strategy», *International Journal of Operations and Production Management*, Vol. 20 No. 5, 2000 (610-628).

Segrestin, D., «L'entreprise à l'épreuve des normes de marché», *Revue Française de Sociologie*, No. 38, 1997 (553-585).

Shiba, S., A. Graham. et D. Walden, *Quatrième révolution du management par la qualité totale*, Dunod, Paris, 1997.

Sigot, F., «S'autoévaluer pour gagner », *Qualité en Mouvement*, No. 41, 1999 (52-58).

Singels, J., G. Ruël and H. Van de Water, «ISO 9000 Series, Certification and Performance», *International Journal of Quality and Reliability Management*, Vol. 18 No. 1, 2001 (62-70).

Stalk, G., P. Evans et L. Shulman, «Les nouvelles règles de la stratégie », *Harvard l'Expansion*, 1992 (81-102).

Sussland, W., «Les cinq P de la performance», *Revue de l'Entreprise*, N°10, 1994 (58-62).

Skorokhodoff, V., «Pas de croissance sans communication interne», *Revue de l'Entreprise*, No. 36, 1998 (66-69).

Whiteley, R. et D. Hesan, *Les avantages compétitifs de l'entreprise orientée clients*, MAXIMA, Paris, 1997.

Weill, M., *L'audit stratégique, Qualité et efficacité des organisations*, AFNOR, Paris la défense Cedex, 1999.

## LES DÉFIS STRATÉGIQUES DE L'APPROVISIONNEMENT ÉLECTRONIQUE

Cet article met en évidence les principaux défis que doivent relever les dirigeants d'entreprises lors de l'adoption des systèmes d'approvisionnement électronique. Ceux-ci sont principalement de trois ordres: l'intégration des processus d'entreprise, la réorganisation de la fonction approvisionnement pour atteindre un maximum d'efficacité, et l'aptitude de l'entreprise à exploiter les applications technologiques relatives à l'approvisionnement électronique.

### Introduction

L'approvisionnement électronique (*e-procurement*) s'impose comme une pratique incontournable pour les gestionnaires; d'ailleurs, les entreprises y recourent de plus en plus pour gérer une part importante de leurs activités d'approvisionnement. Il a représenté un volume total d'environ \$250 milliards en 2000 et les estimations pour l'an 2002 démontraient une croissance exponentielle à \$ 842 milliards (Deloitte Research et Forrester Research, 2000).

Une étude réalisée par le *Center for Advanced Purchasing Studies* (1998) indique que le développement du commerce électronique dans Internet constituera une des principales sources de défis et d'opportunités pour la gestion des approvisionnements dans les prochaines années. En effet, la pratique de l'approvisionnement électronique requiert des entreprises la mise en place d'un certain nombre d'outils appropriés (Internet, Intranet, Extranet, logiciel du *e-procurement*, *marketplaces*, etc) qui souvent, remettent en question les processus de réalisation de certaines activités d'approvisionnement et entraînent des transformations et des innovations dans leur gestion.

Selon une revue d'affaires, les défis stratégiques que pose de ce point de vue l'application des technologies du commerce électronique au niveau de la fonction approvisionnement n'ont pas encore été clairement explorés, ni fait l'objet d'analyses structurées (*Fortune*, 1999). Conséquemment, les gestionnaires peuvent ne pas toujours avoir conscience de la nécessité d'une prise en compte des dimensions stratégiques de l'intégration des technologies de l'approvisionnement électronique dans leur entreprise.

Compte tenu de cet état de fait, cet article vise à présenter les défis stratégiques dont les gestionnaires devraient tenir compte dans leurs réflexions et décisions relativement au choix et à l'utilisation des outils de l'approvisionnement électronique. Il est articulé autour de deux points: 1) tout d'abord, nous montrons comment l'approvisionnement électronique peut transformer la gestion des approvisionnements dans les entreprises; 2) ensuite, nous examinons les changements internes que les dirigeants d'entreprises doivent gérer au niveau stratégique pour espérer tirer avantage de la mise en place d'outils de l'approvisionnement électronique.

Ce faisant, cet article peut guider les dirigeants d'entreprises dans leur processus de réflexion quant à l'intégration des outils de l'approvisionnement électronique à leurs processus d'affaires.

## L'approvisionnement électronique: des outils pour l'innovation du processus de gestion des approvisionnements

L'approvisionnement électronique recouvre différents types d'applications technologiques qui peuvent aller de la simple exécution électronique d'une activité du processus d'approvisionnement, à la modification des approches de gestion des approvisionnements (*Fortune*, 2000).

Les applications technologiques permettant de conduire électroniquement les activités du processus d'approvisionnement peuvent être classées en trois grandes catégories d'outils : les catalogues électroniques, les *logiciels e-procurement* appelés aussi *Desk Purchasing Systems* dans leur version *Buy-side solutions* et *Sell-side solutions*, et les *Marketplaces* (voir tableau 1).

Le **catalogue électronique** est l'outil de base permettant à un ou plusieurs fournisseurs d'offrir l'accès via Internet, Extranet ou Intranet, à l'information sur les différents produits et services offerts. Ce catalogue est constamment mis à jour et permet de diriger directement le client vers un service de commande en ligne. Par exemple, le système d'approvisionnement de CHEMACX.com sur Internet et sur l'intranet, permet aux scientifiques de commander des réactifs et des fournitures de laboratoire directement à partir de leur bureau à l'aide d'un navigateur Web. Ce système d'approvisionnement s'avère être un bon outil tant du point de vue des clients pour la recherche et la commande des produits dont ils ont besoins, que de celui des fournisseurs dans la mesure où il permet une gestion optimale des commandes. Toutefois, les catalogues électroniques visent en général une cible très étroite.

Les **logiciels e-procurement** sont des applications technologiques permettant aux entreprises l'accès à différentes informations et fonctionnalités d'approvisionnement à partir de divers postes de travail. Essentiellement, elles automatisent et supportent les transactions d'approvisionnement, elles consolident les informations sur les produits et les fournisseurs dans un unique catalogue électronique de produits multi-fournisseurs (*MSC: multiple supplier catalogue*) et incorporent l'accès aux données importantes se trouvant dans les systèmes d'information ou les systèmes ERP en place dans l'entreprise.

Par exemple, le e-ProSolutions est une application de l'approvisionnement électronique qui facilite la gestion de tout le processus d'achat, de la gestion des fournisseurs à la livraison des pièces. Cette suite d'outils permet de réduire le temps passé à des tâches administratives et de consacrer plus de temps aux tâches à haute valeur ajoutée.

La mise en place de telles solutions offre les avantages suivants :

- réduction sensible des coûts administratifs de gestion des achats;
- rationalisation des processus internes;
- meilleur suivi et contrôle rigoureux des achats dans l'entreprise;
- meilleure gestion des besoins des utilisateurs;
- amélioration de la qualité des informations;

Actuellement, l'application des *logiciels e-procurement* est limité au domaine des biens et services pouvant être classés selon des spécifications claires dans le catalogue électronique du logiciel. Dans le futur, le développement de ces applications devrait permettre d'inclure des fonctionnalités d'approvisionnement complexes telles que les pratiques d'enchères ou de soumissions.

Les **marketplaces** sont constitués de divers types de plates-formes (ou places de marchés) disponibles sur le web. Celles-ci sont destinées à favoriser des rencontres entre plusieurs vendeurs et acheteurs.

Souvent gérées par une tierce partie, les places de marchés recouvrent les marchés verticaux (qui desservent une industrie spécifique) et horizontaux (qui desservent différentes

industries). Elles offrent une base de fournisseurs plus large et des coûts de recherche et de transaction moins élevés.

Quelques entreprises, surtout celles ayant une envergure internationale y voient un moyen pour accéder à certaines sources d'approvisionnement. À titre d'exemple, Quebecor World inc. a annoncé son projet d'étendre ses activités internationales d'approvisionnement en créant un marché privé complet interentreprises. Quebecor World entend bâtir une plate-forme d'approvisionnement électronique à l'intention de toutes ses constituantes, ce qui lui permettra de réaliser des économies et d'augmenter l'efficacité de ses opérations dans tous les domaines de l'approvisionnement qui l'intéressent.

Les marchés électroniques sont considérés comme une innovation en gestion des approvisionnements dans la mesure où ils favorisent et supportent de nouvelles formes d'achats dynamiques. **Covisent**, l'un des marchés électroniques les plus connus actuellement dans le secteur de la construction automobile offre aux entreprises de ce secteur un cadre adéquat pour les pratiques telles que les enchères (*e-auction*), les appels d'offres et les échanges.

**Tableau 1:** Les principaux outils de l'approvisionnement électronique

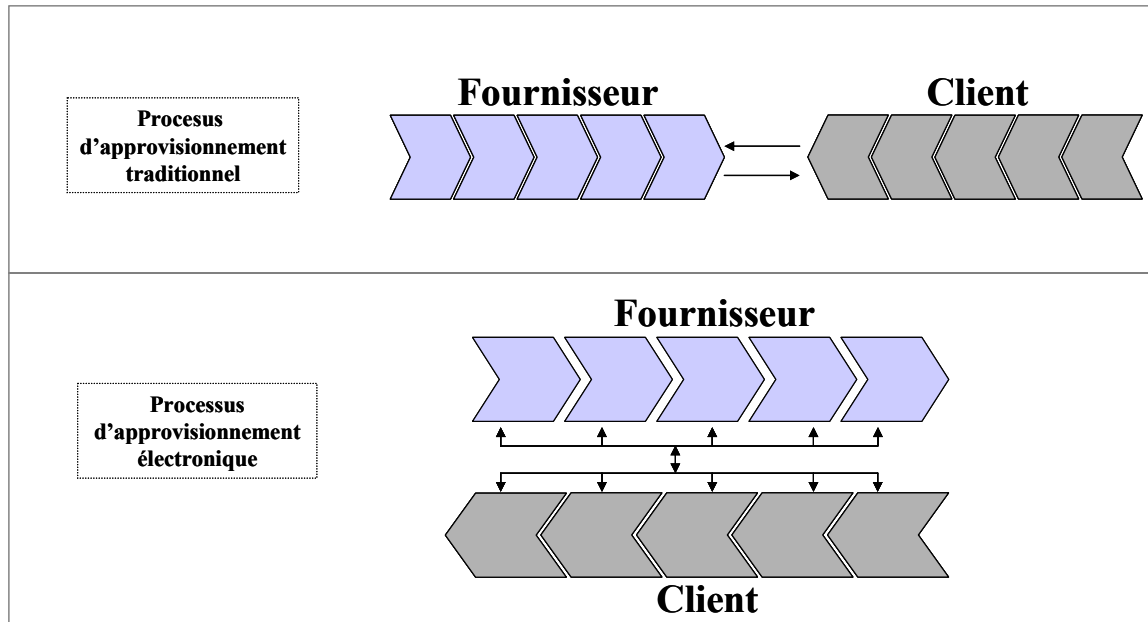
| Catégories d'outils du e-procurement                                                                  | Principaux apports à la gestion du processus d'approvisionnement                                                                                                                                                                        |
|-------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Les catalogues électroniques                                                                          | <ul style="list-style-type: none"> <li>• Accessibilité à l'information détaillée sur les fournisseurs, les produits, les prix, etc., dans des délais réduits et à moindre coût...</li> </ul>                                            |
| Les logiciels du e-procurement<br>( <i>Buy-side solutions</i> et <i>Sell-side solutions</i> )         | <ul style="list-style-type: none"> <li>• Interaction entre les clients et les fournisseurs (réquisition, suivi de la commande, etc.) et synchronisation des processus des entreprises (clients et fournisseurs)</li> </ul>              |
| Les Marketplaces<br>( <i>Places de marchés verticaux et horizontaux, les enchères électroniques</i> ) | <ul style="list-style-type: none"> <li>• Intégration de la chaîne d'approvisionnement des acheteurs et des fournisseurs, et participation dans de nouveaux marchés électroniques (enchères, échanges, achats groupés, etc.).</li> </ul> |

Les outils de l'approvisionnement électronique comportent en fait des opportunités d'innovation des pratiques d'approvisionnement que les entreprises peuvent exploiter plus ou moins bien, selon leur capacité à choisir et à intégrer judicieusement ceux qui sont les plus appropriés au contexte de leurs activités (Pant et Ravichandran, 2001). Plus spécifiquement, les outils de l'approvisionnement électronique ont le potentiel de modifier le processus de réalisation des activités du cycle d'approvisionnement et d'entraîner les entreprises vers un nouveau niveau d'efficacité et d'efficacité (Lewin et Johnston, 1996; Archer et Yuan, 2000).

Pour s'en convaincre, il suffit de remarquer que dans le modèle du processus d'approvisionnement traditionnel (voir figure 1), une transaction entre un client et son fournisseur résulte d'une approche séquentielle de part et d'autre. D'un côté, le client ne s'engage dans une transaction qu'au terme d'un processus séquentiel allant de la reconnaissance d'un besoin jusqu'à la conclusion de la transaction; de l'autre côté, l'attitude du fournisseur résulte d'une succession des décisions prises aux différentes étapes de son processus de vente. Un tel contexte crée entre autres des lourdeurs administratives dont une des conséquences est le long délai des transactions.

À l’opposé, le modèle du processus d’approvisionnement électronique recouvre de nouvelles façons de faire et de nouvelles dynamiques de réalisation des activités du processus d’approvisionnement. En ce sens, on peut noter que les outils de l’approvisionnement électronique accroissent sensiblement les possibilités d’interaction entre les entreprises et améliorent la qualité, la rapidité et la flexibilité dans la transmission de l’information.

Comme l’illustre la figure 1, l’approvisionnement électronique est associé à une nouvelle perspective de gestion des activités du processus d’approvisionnement, notamment au regard de la position des contacts avec les fournisseurs, de la nature de ces contacts et de leurs coûts.



**Figure 1: L’approvisionnement traditionnel et l’approvisionnement électronique**

Source: Adapté de SMITH (2000)

Alors que dans les pratiques traditionnelles, le contact avec le fournisseur ne se fait qu’à la fin du processus de recherche du fournisseur, dans le modèle de l’approvisionnement électronique, les capacités technologiques de traitement de l’information et d’interaction offrent plus de latitude et de flexibilité pour l’établissement de contacts entre clients et fournisseurs à différentes étapes de leur processus respectif.

Aussi, avec les technologies traditionnelles, les entreprises doivent se contraindre à un seul fournisseur ou un nombre très réduit de fournisseurs pour l’établissement de liens électroniques (exemple EDI) et doivent maintenir une relation à long terme pour rentabiliser l’investissement technologique. À l’inverse, les outils de l’approvisionnement électronique constituent des moyens favorisant différents types de relations (informationnelles, décisionnelles ou transactionnelles), et permettant à la fonction approvisionnement et ultimement à l’entreprise, de disposer de plus de flexibilité dans le choix de la relation la mieux adaptée à ses besoins.

Toutefois, si le modèle de l’approvisionnement électronique semble très attrayant pour les entreprises, quelques préalables sont nécessaires. En particulier, l’adoption du système d’approvisionnement électronique exige la maîtrise de l’intégration de nouveaux outils aux processus d’affaires des entreprises, ce qui suppose une gestion stratégique des changements qu’ils engendrent. En ce sens, l’approvisionnement électronique comporte des défis importants que les gestionnaires doivent considérer au niveau stratégique. Ce sont ces différents défis que nous analysons dans la section suivante.

## **Les changements internes à maîtriser**

Transformer le potentiel des outils de l'approvisionnement électronique en avantages concurrentiels nécessite qu'une approche stratégique soit adoptée pour l'implantation de ces outils dans les entreprises (Stonich, 2001; *Fortune*, 2000). Certains auteurs (entre autres Smith, 2000) estiment dans cette optique que le préalable à l'utilisation efficace des outils de l'approvisionnement électronique réside dans un effort de réingénierie des processus. Le nombre encore réduit d'entreprises ayant concrétisé les avantages stratégiques de l'approvisionnement électronique s'explique au moins en partie par des changements profonds internes à l'entreprise qui devraient accompagner l'adoption de l'approvisionnement électronique, et qui ne sont malheureusement pas souvent réalisés (*Fortune*, 2000).

En ce sens, la pratique de l'approvisionnement électronique cache de véritables défis que les gestionnaires doivent prendre en compte dans leur démarche d'adoption des outils de l'approvisionnement électronique (McIvor, Humphreys et Huang, 2000). Ces défis sont essentiellement liés à l'exigence d'une meilleure intégration des différents processus de l'entreprise, et à la nécessité d'aligner le processus d'approvisionnement et l'organisation de la fonction approvisionnement par rapport au nouveau modèle d'affaires de l'entreprise.

En effet, la mise en œuvre des outils de l'approvisionnement électronique dans les entreprises nécessite que soient préalablement réalisés de manière harmonieuse :

- l'intégration du processus d'approvisionnement avec les autres processus d'affaires de l'entreprise ;
- la réorganisation de la fonction approvisionnement, en cohérence avec le nouveau modèle d'affaires de l'entreprise. Une telle réorganisation est le préalable au déploiement et au partage de l'information entre les différents groupes ou centres d'actions et de décisions de l'organisation;
- le réaménagement des activités du processus d'approvisionnement.

Chacun de ces trois principaux points sera traité dans les sections qui suivent.

### **L'intégration des processus de l'entreprise**

L'intégration cohérente du processus d'approvisionnement avec les autres processus d'affaires des entreprises constitue une des principales exigences pour une utilisation efficace des outils de l'approvisionnement électronique. En effet, le degré d'intégration des activités du processus d'approvisionnement détermine l'importance des modifications affectant la position, le rôle et le niveau de participation des différents intervenants dans ce processus (Gebaur, Beam et Segev, 1998; Croom, 2000). Il a un impact sur le degré de formalisation dans le processus de gestion des opérations. Il permet aussi une plus ou moins grande flexibilité dans le choix des structures d'approvisionnement, et conditionne le choix du degré de centralisation.

Ainsi, le gestionnaire des approvisionnements doit notamment susciter et contribuer à une meilleure gestion des changements qu'entraîne la mise en place et l'utilisation des outils de l'approvisionnement électronique dans l'entreprise globalement, mais en particulier, il doit surtout se préoccuper des défis relatifs à la réorganisation de la fonction approvisionnement, et à ceux liés au réaménagement des activités du processus d'approvisionnement.

### **La réorganisation de la fonction approvisionnement**

Les changements dans l'organisation de la fonction approvisionnement concernent en particulier l'évolution du rôle des professionnels en approvisionnement et de celui des utilisateurs internes des biens achetés. En effet, avec le système d'approvisionnement électronique, de nombreuses activités du processus d'approvisionnement (recherche d'informations sur les

fournisseurs et les prix notamment) sont laissées à la charge des utilisateurs. Autrement dit, au sein du service d'approvisionnement, on assiste à une décentralisation des activités cléricales, celles-ci étant dorénavant exercées par les utilisateurs internes. Ledoux (2000) indique de ce fait que dans le contexte d'approvisionnement électronique, la fonction approvisionnement connaît une réorganisation des rôles de ses professionnels, ce qui conduit également à un nouveau positionnement de sa nouvelle communauté d'acheteurs.

En effet, les pratiques de l'approvisionnement électronique changent le profil des tâches assurées par les gestionnaires. En conséquence, les professionnels en approvisionnement sont placés devant le défi de maîtriser de nouvelles exigences de gestion. Celles-ci sont surtout liées aux besoins de développement de connaissances plus élargies, essentiellement au niveau technique et stratégique.

- *Exigences relatives à la maîtrise des compétences techniques par les approvisionneurs*

Compte tenu de leur impact sur le déploiement des stratégies d'entreprise dans le domaine de l'approvisionnement, la maîtrise des outils de l'approvisionnement électronique représente un grand défi pour les professionnels en approvisionnement. Des connaissances plus techniques sont donc nécessaires afin de les maîtriser ou de les configurer selon les réels besoins des entreprises. En ce sens, certains auteurs (dont Porter, 2000) estiment qu'avec le système d'approvisionnement électronique, le profil des approvisionneurs devrait évoluer vers celui d'analyste ou de gestionnaire d'informations. En effet, des qualifications dans l'analyse et l'interprétation des informations et dans la définition et l'emploi des indicateurs pertinents sont encore plus nécessaires dans le contexte de l'approvisionnement électronique, compte tenu de l'abondant flux d'informations auxquelles on a accès.

- *Exigences au niveau des compétences stratégiques des approvisionneurs*

Avec le système d'approvisionnement électronique, la réflexion stratégique sur le choix des modes d'approvisionnement et de leur implantation dans les entreprises devient une des tâches importantes pour les approvisionneurs. En permettant un transfert de la charge des activités cléricales aux utilisateurs, le système d'approvisionnement électronique favorise une réorientation des gestionnaires en approvisionnement vers des tâches plus stratégiques. Ceci crée chez des approvisionneurs des exigences de nouvelles compétences de niveau stratégique pour la conception et le déploiement de nouvelles pratiques d'approvisionnement profitables pour l'entreprise.

De plus, grâce à l'exploitation des potentialités d'intégration et d'interaction des outils de l'approvisionnement électronique, l'évolution des pratiques d'approvisionnement amène les gestionnaires en approvisionnement à travailler de plus en plus étroitement avec les autres fonctions de l'entreprise dans le cadre de stratégies « collaboratives », par exemple pour la conception des produits ou de services. L'implication des gestionnaires en approvisionnement dans de nouvelles activités et surtout dans de nouvelles fonctions exige ainsi l'acquisition de nouvelles connaissances ou compétences plus polyvalentes, que ce soit sur d'autres fonctions ou sur la gestion de l'entreprise en général.

Tous ces éléments exigent l'orientation et l'élévation du profil des approvisionneurs vers celui de "stratégiste".

### **Le réaménagement des activités du processus d'approvisionnement**

L'implantation et l'intégration des pratiques d'approvisionnement électronique dans les entreprises s'accompagnent des changements au niveau du "design" des flux d'informations dans

les processus et entraînent le réaménagement des relations entre ces flux et les processus physiques.

L'introduction de certains outils de l'approvisionnement électronique dans l'entreprise – en particulier les logiciels du E-procurement – s'accompagne d'une modification des processus informationnels (circulation, traitement, décisions) qui supportent les opérations d'approvisionnement. Ces processus doivent en effet être réaménagés afin d'instituer une cohérence dans la nouvelle chaîne de valeur de l'entreprise.

Certes, l'utilisation de ces outils accroît les possibilités d'échanges et favorise la circulation de l'information en temps réel, aussi bien à l'intérieur du service d'approvisionnement qu'entre ce dernier et les autres services de l'entreprise. Cependant, la synchronisation des flux d'informations avec les flux physiques est un aspect critique pour la réussite des nouvelles pratiques d'approvisionnement. Le défi à ce niveau est d'autant plus important que l'expérience des entreprises démontre que celles qui connaissent moins de succès n'ont pas adapté leur processus logistique au nouveau contexte de l'approvisionnement électronique (Stonich, 2001). Celui-ci exige notamment que soit réalisé l'alignement technologique des systèmes d'information des entreprises avec ceux de leurs partenaires.

Par ailleurs, le système d'approvisionnement électronique modifie divers aspects dans le déroulement du processus d'approvisionnement en changeant les positions de contacts et la nature de ces contacts. Ceci comporte plusieurs défis pour la gestion des opérations, dans la mesure où il faut gérer plusieurs contacts dans le processus d'approvisionnement sous différentes formes. Cela implique également la détermination des degrés d'échange de l'information et du niveau de transparence dans les opérations à établir avec les partenaires.

La maîtrise des différents changements internes à l'entreprise qui sont logiquement associés à l'adoption des outils de l'approvisionnement électronique est donc déterminante pour l'intégration harmonieuse de cette pratique dans l'entreprise; elle est aussi garante du succès de ce système d'approvisionnement dans l'entreprise. Les entreprises qui sauront gérer les changements ainsi identifiés, réussiront véritablement à tirer avantages du système d'approvisionnement électronique.

## **Conclusion**

Bien que certaines études aient déjà démontré que la pratique de l'approvisionnement électronique dans quelques entreprises ait conduit à des résultats concluants tant du point de vue de la réduction des coûts que des temps de cycle (Ledoux, 2000), il n'est pas certain que les dirigeants d'entreprises aient toujours conscience des défis à relever pour véritablement tirer avantage du potentiel d'innovation de la gestion des approvisionnements qu'offrent les outils aujourd'hui disponibles.

En effet, certaines entreprises qui s'engagent dans la pratique de l'approvisionnement électronique ne semblent pas avoir bien compris l'importance de l'intégration. Pourtant, pour obtenir le maximum de retombées en termes d'accroissement d'efficacité et de réduction de coûts, l'entreprise doit associer étroitement les applications de l'approvisionnement électronique et les systèmes de gestion internes. En ce sens, un des défis majeurs est de savoir établir un pont entre ses systèmes traditionnels et les nouvelles applications électroniques.

Par ailleurs, la capacité de l'entreprise à évoluer en harmonie avec le système d'approvisionnement électronique est déterminante pour son succès. Cette capacité recouvre trois dimensions : organisationnelle, technologique et le degré de collaboration entre les fonctions de l'entreprise.

Ainsi, les entreprises qui réussiront un arrimage harmonieux entre le choix et l'intégration des technologies du système de l'approvisionnement électronique et leur modèle d'affaires sont celles qui réussiront vraiment à tirer des avantages substantiels d'un système d'approvisionnement électronique.

## Références

ARCHER, Norm et YUAN, Yufei, "Managing Business-to-Business Relationships throughout the E-commerce Procurement Life Cycle", *Internet Research: Electronic Networking Applications and Policy*, vol. 10, n° 5, 2000, pp. 385-395.

Center for Advanced Purchasing Studies (CAPS): " The Future Of Purchasing and Supply: A Five and Ten-Year Forecast", équipe de recherche : Carter, P.L., Carter, J.R., Monczka, R. M., Slaughter, T.H., Swan, A.J., Tempe, Arizona, 1998, 95 pages.

CROOM, Simon R., "The Impact of Web-based Procurement on the Management of Operating Resources Supply", *The Journal of Supply Chain Management*, hiver 2000, pp.4-13.

DELOITTE Research et FORRESTER Research, "The New Economics of Transactions : Evolution of Unique E-business Internet Market Spaces", *Deloitte Consulting LLC*, Atlanta, Georgia, 2000.

*FORTUNE*, *E-Procurement : automation to collaboration*", Special Advertising Section, November 13, 2000, S4-S39.

*FORTUNE*®, *Strategic Procurement, How the Internet Changes Purchasing*, May 24, 1999.

GEBAUER, Judith., BEAM, Carrie et SEGEV, Arie, "Impact of the Internet on Procurement", *Acquisition Review Quarterly*, hiver 1998, pp.167-181.

LEDOUX, L. *E-procurement: Going for Buy-side or Marketplace Solutions?*, Arthur D. Little, 2000, Bruxelles, 13 pages.

LEWIN, Jeffrey, E. et JOHNSTON, Wesley, J., "The Effects of Organizational Restructuring on Industrial Buying Behavior: 1990 and Beyond", *Journal of Business & Industrial Marketing*, vol. 11, n° 6, 1996, pp. 93-111.

McIVOR, Ronan, HUMPHREYS, Paul et HUANG, George, "Electronic Commerce: Re-engineering the Buyer-Supplier Interface", *Business Process Management Journal*, vol. 6, n° 2, 2000, pp.122-138.

PANT, Somendra et RAVICHANDRAN, T., "A Framework for information systems planning for e-business", *Logistics Information Management*, vol. 14, n° 1/2, 2001, pp.85-98.

SMITH, Thomas W., "eMarkets – It's not just about Procurement", Critical Issues Publication of the Retail Intelligence System, PriceWaterhouseCoopers, September 2000, 12 pages.

PORTER, A.M., "Experts see Big Future for E-Procurement", *Purchasing*, Vol. 128, n° 4, 23 mars 2000, pp. 21-36.

STONICH Mark, "What it takes to make e-procurement work", *PRTM's Insight*, Summer/Fall 2001, pp. 1-5.

## **PLANIFICATION DE LA PRODUCTION D'UNE MACHINE MULTITÂCHE :UNE APPLICATION PRATIQUE DANS L'INDUSTRIE DE LA CHAUSSURE**

Nous étudions un problème d'ordonnancement sur une machine multitâche. L'approche proposée a été testée sur les données d'une année de production d'une entreprise de fabrication de chaussures de la région de Québec. Diverses simulations ont démontré l'efficacité des procédures développées et la parfaite faisabilité des solutions proposées. Un logiciel complet a été développé et implanté en entreprise. Le logiciel est actuellement utilisé pour la planification courante de la production de l'année 2003.

### **Introduction**

Cet article présente un ensemble de méthodes que nous avons développées afin de planifier la production d'un important fabricant de chaussures situé à la ville de Québec. Cette entreprise est une des plus grandes entreprises manufacturières de chaussures au Canada. Elle emploie actuellement plus de 360 employés et son chiffre d'affaire est supérieur à 10 millions de dollars annuellement. Reconnue internationalement, elle exporte une partie de sa production aux États-Unis où elle approvisionne plusieurs magasins à grande surface. Dans le cadre de cette recherche, nous nous sommes concentrés sur l'optimisation de la production d'une gamme particulière de produits, les bottes d'hiver qui possèdent une coquille monobloc faite de composé de caoutchouc. Nous avons développé un logiciel qui est présentement utilisé par l'entreprise pour planifier efficacement la production des bottes en fonction des dates de livraison et de la disponibilité des matières premières.

Quelque soit le modèle fabriqué, chaque botte se décompose en trois parties : la coquille (ou claque), la doublure et la hausse. La coquille est la partie de la botte qui soutient le pied, ses caractéristiques principales sont d'être robuste, imperméable et de résister à la perforation occasionnée par les torsions dues à la marche. La doublure est généralement faite de feutre de polyester. Finalement, la hausse est confectionnée de nylon hydrofuge. Les feutres sont fabriqués à l'aide d'une machine de découpe automatique à contrôle numérique qui optimise les patrons de coupe. La capacité de production de cette machine fait en sorte qu'elle ne pose aucun problème de planification. Les hausses sont achetées de Chine et livrées par bateau avec un délai de livraison de trois mois. Les coquilles sont fabriquées à l'aide d'une machine à injection possédant huit bras sur lesquels peuvent être installées des moules de diverses grandeurs. La coquille est elle-même composée de deux parties, la semelle et le contour qui peuvent être de couleur différente. En conditions d'opération normale, la capacité de production de la machine de découpe du feutre est de 300 feutres à l'heure, la capacité d'assemblage des bottes est d'environ de 1 000 paires à l'heure alors que l'injection se fait à un taux d'environ 60 paires de coquilles à l'heure. Les quarts de travail sont de 7 heures et l'entreprise peut en utiliser jusqu'à trois en période de pointe. La machine à injection constitue clairement le goulot du système de production. Nous avons donc développé un système d'ordonnancement complet afin de planifier la fabrication des bottes sur la machine à injection.

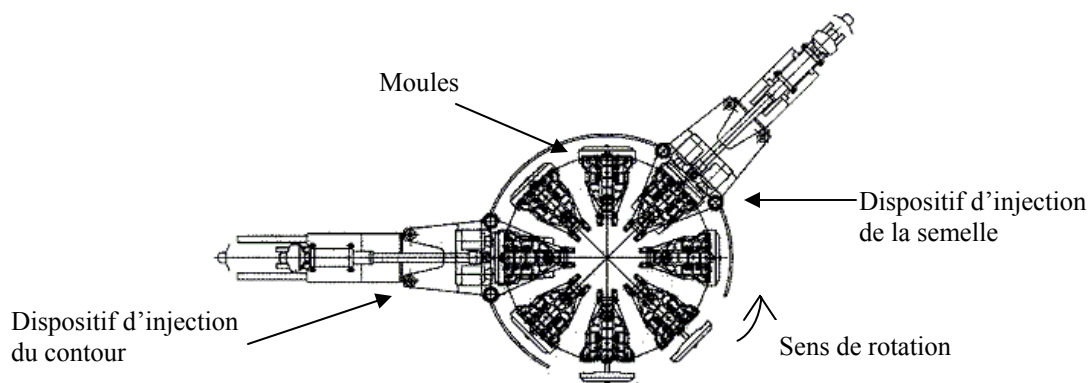
La suite de cet article est organisée comme suit. Nous commençons par définir précisément le contexte du problème de la fabrication. Suit une revue de la littérature sur les problèmes de production apparentés. Nous décrivons ensuite l'approche de résolution, le logiciel développé et présentons des résultats sur les commandes de la dernière année de production. Les conclusions de cette recherche terminent cet article.

### Définition du problème

Commençons par présenter les caractéristiques de la demande pour ensuite définir le fonctionnement de la machine à injection. Les commandes des clients sont reçues très longtemps à l'avance. Typiquement, en février et mars, près de 90% des commandes sont reçues avec des dates de livraison en octobre et novembre. En avril, l'ensemble du carnet de commande est connu. Nous avons donc  $n$  commande provenant de clients externes à l'entreprise. Chaque commande  $c_i$  ( $i = 1 \dots n$ ) possède une date de livraison  $d_i$ , un modèle  $m_i$  et une combinaison de couleurs  $k_i$  pour la coquille. À chaque commande  $c_i$  est associée des quantités à produire  $q_{ij}$  pour chacune des  $p$  pointures disponibles ( $j=1 \dots p$ ). En pratique, en combinant les bottes pour enfants et pour adultes, la planification doit tenir compte d'un total de 22 pointures en 13 combinaisons de couleurs.

Les caractéristiques de la machine à injection sont les suivantes. La machine possède  $y$  bras, chaque bras pouvant produire l'une des  $p$  pointures. Une pointure ne peut être produite que sur un seul bras à la fois car il n'y a qu'un seul moule de disponible pour chaque pointure. Chaque changement de moules sur un bras demande un temps de réglage de  $s_1$  minutes et chaque changement de couleurs un réglage de  $s_2$  minutes. Les deux opérations de réglage ne peuvent être effectuées simultanément et les temps sont cumulatifs car il y a un seul opérateur dans l'usine. Notons qu'un changement de couleur affecte la couleur de tous les moules sur les  $y$  bras de la machine. De plus, lors d'un changement de moule, la production de tous les bras de la machine est arrêtée. Le temps de fabrication d'une paire est de  $t$  minutes, quelque soit le modèle, la couleur ou la pointure. La machine possède deux points d'injection, un pour la semelle, l'autre pour le contour. Le passage d'un modèle de couleur rouge-noir à noir-rouge demande donc un changement de couleur aux deux points d'injection pour un temps total de  $2s_2$  minutes. En pratique, la machine possède 8 bras, les temps de réglage des moules ( $s_1$ ) sont de 30 minutes et les temps de réglage des couleurs ( $s_2$ ) sont de 45 minutes. Compte tenue du temps de rotation de la machine, la cadence de production, qui est indépendante de la pointure ou de la couleur, est de 60 paires de coquilles à l'heure soit une paire à la minute ( $t=1$ ). La Figure 1 présente une vue schématique de la machine à injection utilisée, on y distingue clairement les 8 bras et les deux points d'injection.

Le problème consiste à définir un horaire de production pour l'ensemble des commandes  $c_i$  selon les quantités désirées  $q_{ij}$  et en respectant les dates de livraison promises et l'ensemble des contraintes opérationnelles. L'horaire de production doit mentionner quels sont les couleurs, pointures et quantités qui sont fabriquées en tout temps, sur chaque bras de la machine, ainsi que les temps précis des divers changements de production. En cas de retard appréhendé, il faut déterminer à quel moment un quart de travail supplémentaire doit être ajouté et quand il peut être éliminé. L'objectif du problème consiste à trouver l'horaire de production réalisable permettant de terminer la production de toutes les commandes le plus tôt possible.



**Figure 1. Vue schématique d'une machine à injection multi-points**

### **Revue de la littérature**

Au meilleur de nos connaissances, il n'existe aucune publication qui porte sur l'ordonnancement d'une machine multitâche telle que la machine de moulage étudiée ici. Il n'existe même pas de publication qui porte sur l'ordonnancement de machines parallèles mais inter-reliées. Rappelons que nous pouvons comparer les bras d'injection de notre machine de moulage à un ensemble de machines parallèles mais liées par le fait que l'arrêt d'un bras pour changer son moule doit entraîner l'arrêt des autres bras également ainsi que par le fait que la machine ne peut injecter qu'une même matière et une même couleur à la fois.

Par contre, la littérature sur l'ordonnancement des machines parallèles non liées est abondante. Cheng et Sin (1990) ont présenté une revue de la littérature disponible sur ce problème. Depuis, plusieurs articles ont été publiés. Cette littérature peut être classifiée selon l'objectif visé et la méthode de résolution proposée. Pour ne citer que quelques articles publiés en 2003, notons celui de Cochran, Horng et Fowler (2003) qui ont proposé un algorithme génétique pour résoudre le problème avec plusieurs objectifs. Sun et Guoqing (2003) proposent de résoudre le problème où l'objectif est de minimiser une pénalité des retards ou avances en utilisant la programmation dynamique. Ils proposent également deux heuristiques pour résoudre le problème de façon approximative. Mokotoff (2003) propose une méthode optimale pour résoudre le problème où l'objectif est de minimiser la durée globale des opérations. La méthode est basée sur l'ajout itératif des coupes valides.

### **Approche de résolution**

Avant d'aller plus loin, il importe de présenter quelques facteurs contextuels qui ont influencé le développement de l'approche de résolution. Dans un premier temps, la distribution de la demande pour les différentes peintures est très variée. La demande pour les petites et les grandes peintures est relativement faible comparativement aux peintures moyennes dont la demande peut être jusqu'à dix fois plus élevée. Comme il est impossible de remplir la machine uniquement avec des peintures à haut volume, la décision de quelles peintures à fabriquer ensemble est primordiale. Il est à noter que certains bras peuvent *tourner à vide*, c'est-à-dire qu'aucune injection n'a lieu dans le moule. La combinaison de couleur (semelle et contour) la plus populaire est le noir-noir. Encore une fois, la demande des coquilles noir-noir peut représenter dix fois la demande de coquilles noir-vert ou encore mauve-mauve. Dans les sections

qui suivent nous présentons d'abord les grandes lignes de la méthode développée puis détaillons chacune de ses étapes.

## Présentation générale

Afin de réduire la complexité du problème, la méthode commence par créer des *groupes de commandes* ayant des caractéristiques similaires. Cela permet de tirer profit du fait que plusieurs commandes différentes peuvent demander des produits similaires. En effet, 10 clients différents peuvent avoir passé des commandes pour des bottes avec des coquilles noir-noir de pointure 13P. Afin de tirer profit de ces regroupements, la méthode détermine ensuite des *blocs de production*, c'est-à-dire des ensembles de groupes de commandes de même couleur. Suit après la phase d'*ordonnancement* qui permet de préparer le calendrier de production.

## Création de groupe de commandes

Pour débiter, les  $n$  commandes clients  $c_i$  sont regroupées en  $u$  commandes groupées  $cg_z$  ( $z = 1 \dots u$ ). Toutes les commandes possédant les mêmes couleurs et la même date d'échéance sont regroupées en une commande groupée. À chaque commande groupée  $cg_z$  est donc associée une couleur  $kg_z$  et une date de livraison  $dg_z$  identique à la couleur et à la date des commandes clients qui la compose. À chaque commande groupée  $cg_z$  est également associé des quantités à produire  $qg_{zj}$  pour chacune des  $p$  peintures disponibles ( $j=1 \dots p$ ) correspondant à la somme des quantités à produire  $q_{ij}$  des commandes clients qui la compose. Chaque commande groupée est alors ordonnancée à l'aide de la méthode d'ordonnancement qui sera présentée plus loin. Après cet ordonnancement, nous avons toutes les informations pour trier les commandes groupées en ordre croissant de la date d'échéance puis, en cas d'égalité, en fonction du temps de production (la commande la plus courte en premier). L'utilisation de ces critères est guidé par l'objectif premier de minimiser les retards et de réduire les temps de passage dans l'atelier.

Si une commande groupée est en retard, des quarts de travail supplémentaires sont ajoutés à rebours à partir de la date d'échéance de la commande groupée jusqu'à ce que le nombre de quarts de travail ajouté permette d'éliminer le retard. Cette étape est effectuée en considérant de façon explicite le calendrier des journées ouvrables ainsi que les diverses dates auxquelles la direction accepte d'augmenter le nombre de quarts de travail.

Après cette étape nous obtenons une première solution complète. Le calendrier de production ainsi obtenu procure une première idée de la séquence de production et de l'ordre dans lequel les couleurs se succéderont. L'étape qui suit, la formation de blocs de production, permet d'améliorer cette solution initiale en fusionnant les commandes groupées afin de réduire les réglages dus aux changements de couleurs et de moules.

## Formation des blocs de production

À cette étape, les  $u$  commandes groupées sont combinées entre elles pour former e bloc de production  $b_h$  ( $h = 1 \dots e$ ). Les commandes groupées qui possèdent des dates d'échéances différentes, mais la même couleur, sont combinées en bloc de production lorsque cela n'entraîne aucun nouveau retard. La production combinée de ces commandes groupées permet d'économiser de nombreux réglages de couleur et de moule. À chaque bloc  $b_h$  est associé une couleur  $kb_h$  et une date de livraison  $db_h$  est égale à la date la plus tôt parmi les dates des commandes groupées qui le compose. À chaque bloc  $b_h$  est également associé des quantités à produire  $qb_{hj}$  pour chacune des  $p$  peintures disponibles ( $j=1 \dots p$ ) correspondant à la somme des quantités à produire  $qg_{zj}$  des commandes groupées qui le composent.

Ce processus commence par affecter la première commande groupée au premier bloc de production. Par la suite, pour chaque commande groupée  $cg_z$ , trouver le dernier bloc de production  $h$  de même couleur que la commande groupée  $cg_z$ . S'il n'y a pas de bloc de même

couleur, créer un bloc comprenant uniquement la commande groupée  $cg_z$  et le placer à la fin de la liste des blocs de production. S'il existe un bloc  $b_h$  de même couleur, additionner les quantités à produire pour  $cg_z$  au bloc  $b_h$ . Évaluer la durée de production de ce bloc et la somme des retards occasionnés sur ce bloc et tout ses successeurs, notons ce retard  $r_1$ . Notons que lors de la création d'un bloc, il est important de refaire son ordonnancement au complet. Si aucun retard n'est créé ( $r_1=0$ ), remplacer le bloc  $b_h$  par la combinaison du bloc  $b_h$  et de la commande groupée  $cg_z$ .

Si un retard est créé ( $r_1>0$ ), évaluer le retard  $r_2$  si la commande groupée  $cg_z$  était placée seule comme un bloc distinct à la fin de la liste des blocs de production. Si aucun retard n'est alors créé ( $r_2=0$ ), créer un bloc comprenant uniquement la commande groupée  $cg_z$  et le placer à la fin de la liste des blocs de production. Si le nouveau bloc crée un retard  $r_2>0$ , un retard est maintenant inévitable. Dans ce cas, les retards  $r_1$  et  $r_2$  sont comparés entre eux. On examine alors comment ces retards pourraient être éliminés par l'ajout de capacité supplémentaire, c'est-à-dire par l'ajout d'un quart de travail de plus. Pour les retards  $r_1$  créé dans le cas de l'ajout de  $cg_z$  au bloc  $b_h$ , calculer la date de début d'un quart de travail additionnel qui permettrait d'éviter ce retard. Déterminer également la date de début d'un quart de travail additionnel pour éliminer le retard  $r_2$ . Choisir l'option qui nécessite l'ajout d'un quart de travail le plus tard.

La Figure 2 illustre de façon très simplifiée le processus de création de blocs de commandes à partir d'un ensemble de 10 commandes groupées. Afin de simplifier la présentation les temps de production ainsi que date d'échéances ne sont pas présentées. Dans cet exemple, chaque paire de lettre (N=Noir, B=Bleu, M=Mauve) représente la combinaison de couleur semelle/contour qui constitue une coquille. Il y a donc 6 combinaisons de couleurs différentes (NN, NB, MM, BB, BM et BN). La première ligne de la figure précise les combinaisons de couleurs des dix commandes groupées. La deuxième ligne indique qu'à la première étape, la méthode nous amène à créer un bloc dont la combinaison de couleurs est Noir-Noir. Lors des trois premières étapes les commandes groupées sont directement transformées en blocs de production. À l'étape 4, la commande groupée numéro 4, dont la combinaison de couleurs est NN, pourrait être regroupée avec le bloc 1-NN. Dans ce cas-ci le regroupement est possible puisqu'il n'engendre aucun retard sur les blocs 2-NB et 3-MM qui sont décallés. L'étape 6 est particulière puisque la commande groupée 6-NB pourrait venir joindre le bloc 2-NB mais puisque cela occasionnerait un retard sur le bloc suivant, 3-MM, la commande groupée 6-NB est simplement placée à la fin de la séquence des blocs. À l'étape 7, la commande 7-MM vient rejoindre le bloc 3-MM repoussant les blocs 5-BB et 6-NB sans créer de retard. Deux autres regroupements en blocs ont lieu aux étapes 9 et 10.

Utilisation maximale de la capacité des bras. Une fois la séquence des blocs de production fixée, la charge de travail de chacun des bras est évaluée en faisant un ordonnancement complet des tâches. Cette charge peut être très inégale d'un bras à l'autre à cause de disparités importantes entre la demande des différentes pointures. Comme la machine, donc l'ensemble des bras, doit tourner jusqu'à ce que la production du bras le plus chargé ait terminé sa production, les autres moules peuvent être sous utilisés affectant ainsi la productivité de la machine. Nous regardons donc s'il est possible de devancer la production complète ou partielle de certaines pointures appartenant à des blocs ultérieurs ayant les mêmes couleurs.

Pour chaque bras, à l'exception du bras ayant la plus grande charge, il faut évaluer la quantité pouvant y être ajoutée sans que cela n'allonge la durée du bloc (qui est égale à la durée du bras le plus chargé). Pour chacune des pointures fabriquées sur un bras, vérifier s'il existe une quantité à produire de cette pointure dans les prochains blocs de même couleur et déplacer cette quantité dans le bloc à l'étude sans allonger la durée de production du bloc. Finalement, pour chacun des blocs dont les quantités ont été modifiées il faut refaire l'ordonnancement de ces tâches.

|          |                    |              |      |      |      |      |      |      |      |      |       |       |
|----------|--------------------|--------------|------|------|------|------|------|------|------|------|-------|-------|
| Étape 1  | Commandes<br>Blocs | 1-NN<br>1-NN | 2-NB | 3-MM | 4-NN | 5-BB | 6-BM | 7-MM | 8-BN | 9-BB | 10-NB |       |
| Étape 2  | Commandes<br>Blocs | 1-NN         | 2-NB | 3-MM | 4-NN | 5-BB | 6-BM | 7-MM | 8-BN | 9-BB | 10-NB |       |
| Étape 3  | Commandes<br>Blocs | 1-NN         | 2-NB | 3-MM | 4-NN | 5-BB | 6-BM | 7-MM | 8-BN | 9-BB | 10-NB |       |
| Étape 4  | Commandes<br>Blocs | 1-NN         | 4-NN | 2-NB | 3-MM | 4-NN | 5-BB | 6-BM | 7-MM | 8-BN | 9-BB  | 10-NB |
| Étape 5  | Commandes<br>Blocs | 1-NN         | 4-NN | 2-NB | 3-MM | 5-BB | 6-BM | 7-MM | 8-BN | 9-BB | 10-NB |       |
| Étape 6  | Commandes<br>Blocs | 1-NN         | 4-NN | 2-NB | 3-MM | 5-BB | 6-NB | 7-MM | 8-BN | 9-BB | 10-BN |       |
| Étape 7  | Commandes<br>Blocs | 1-NN         | 4-NN | 2-NB | 3-MM | 7-MM | 5-BB | 6-NB | 7-MM | 8-BN | 9-BB  | 10-BN |
| Étape 8  | Commandes<br>Blocs | 1-NN         | 4-NN | 2-NB | 3-MM | 7-MM | 5-BB | 6-NB | 8-BN | 9-BB | 10-BN |       |
| Étape 9  | Commandes<br>Blocs | 1-NN         | 4-NN | 2-NB | 3-MM | 7-MM | 5-BB | 9-BB | 6-NB | 8-BN | 9-BB  | 10-BN |
| Étape 10 | Commandes<br>Blocs | 1-NN         | 4-NN | 2-NB | 3-MM | 7-MM | 5-BB | 9-BB | 6-NB | 8-BN | 10-BN |       |

**Figure 2. La formation de bloc de production à partir des commandes groupées**

### Méthode d'ordonnancement des blocs de production

Tel que mentionné précédemment, à chaque bloc de production  $b_h$  est associé des quantités à produire  $qb_{hj}$  pour chacune des  $p$  pointures disponibles. Notons qu'il est possible qu'il y ait aucune demande pour certaines pointures,  $qb_{hj}=0$ , ce qui fait que le nombre de pointure à produire pour un bloc peut être moindre que  $p$ . Pour un bloc donné, l'étape d'ordonnancement consiste donc à trouver, sur l'ensemble des bras de la machine, la meilleure séquence de production permettant de minimiser le temps de production total.

Il n'existe, au meilleur de nos connaissances, aucune littérature permettant de planifier la production d'une machine multitâche. Par contre, il est possible de tracer certaines analogies avec la planification de la production de machines parallèles mais inter-reliées. En effet, chaque bras peut être considéré comme une machine parallèle en ajoutant la contrainte que lorsqu'un bras (machine) est arrêté pour un changement de moule, tous les autres bras (machines) sont également arrêtés. Il est bien connu que le problème de minimiser le temps de traitement d'un ensemble de commande (sans préemption) dans un atelier ayant  $m \geq 2$  machines parallèles est NP-complète (Lenstra et Rinnooy Kan, 1978). Par contre il existe d'excellentes heuristiques pour ce problème. Nous avons donc adaptés deux algorithmes développées pour les machines parallèles et pour lesquels des bornes sur la déviation maximale existent (Garey et al., 1978). Ces sont l'algorithme du temps d'opération le plus long et l'heuristique Multifit (Coffman et al., 1978).

Notre adaptation de l'algorithme du temps d'opération le plus long (OPL) commence par trier les pointures en ordre décroissant du temps de production. Comme la vitesse de production est la même pour toutes les pointures, nous pouvons trier selon les quantités à produire. Selon l'ordre de priorité ainsi établi, les quantités sont affectées au premier bras libre. À chaque fois qu'un bras se voit affecté une pointure nécessitant un changement de moule, un temps de réglage de  $s_1$  minutes doit être ajouté au temps de chaque bras.

Notre adaptation de l'heuristique Multifit part de la solution obtenue par l'algorithme du temps d'opération le plus long et tente d'en réduire la durée de façon itérative. Cette adaptation fonctionne comme suit:

1. Trouver une solution initiale à l'aide de l'algorithme OPL. Soit  $D$  la durée totale de production. Notons  $D^*=D$  la meilleure durée trouvée ainsi que l'ordonnancement correspondant.
2. Réduire la durée  $D$  d'une heure. Considérer toutes les peintures comme non assignées.
3. Parmi les peintures non assignées à un bras, prendre la peinture dont le temps de production est le plus long et l'affecter au premier bras pouvant en terminer la production avant la durée cible  $D$ , aller à 4. Si aucun bras ne peut terminer la production avant  $D$ , l'algorithme arrête, aller à 5.
4. S'il reste encore des peintures non assignées, retour à l'étape 3. Si toutes les peintures ont été assignées, une meilleure solution a été trouvée. La durée de production  $D$  de cette solution est mise égale à la durée de production du bras le plus long. Fixer  $D^*=D$  et retourner à 2.
5. Aucune amélioration ne peut plus être apportée, la meilleure solution est  $D^*$ .

La solution trouvée est implantée en considérant les moules en place à la fin du bloc de production précédent et en effectuant les changements de moules nécessaires pour pouvoir débiter la production du bloc actuel. Tout dépendant du nombre de peintures devant être produites, nous avons observé que certaines solutions pouvaient être améliorées en prenant explicitement en compte les moules en place à la suite de la production du bloc précédent. Deux procédures considérant les moules en places sont présentées à la section précédente.

Considération des moules en place. Nous avons développé deux procédures qui tiennent compte des moules en place à la fin du bloc de production précédent. La première procédure conserve chaque moule en place et leur affecte directement la quantité à produire si une telle quantité existe. Les peintures restantes sont simplement planifiées selon l'algorithme OPL.

La deuxième procédure considère la possibilité de conserver uniquement une partie des moules en place. Pour évaluer cette possibilité, les  $y$  plus grandes quantités à fabriquer sont identifiées. Seuls les moules en place correspondant à ces quantités sont maintenus et les peintures correspondantes leur sont alors affectées. Les peintures restantes sont planifiées selon l'algorithme OPL. Parmi les trois solutions trouvées, celle procurant le temps de production total le plus court est finalement adoptée.

### **Implantation et résultats**

L'approche proposée a été développée en Microsoft Visual Basic 6.0. Le logiciel développé permet l'entrée complète des commandes clients ainsi que la mise à jour interactive des quantités produites. Lorsque les quantités produites diffèrent des quantités planifiées (interruption imprévue de la production, bris d'un moule, ...), un nouvel horaire de production est simplement généré. Puisque dans l'environnement de production étudié chaque machine est dédiée à la fabrication d'un modèle particulier, le logiciel génère les solutions par modèle. La Figure 3 ci-dessous présente l'interface développée pour la gestion des commandes clients.

Le logiciel peut également être configuré pour tenir compte des caractéristiques de la machine comme le nombre de bras, la cadence de production en nombre de paires par heure et les moules en place lors de l'élaboration de l'horaire de production. Les informations sur la date de réalisation de l'horaire ainsi que sur le nombre de quarts de travail actuellement utilisés doivent également être entrées.

**Commandes**

|    | Active ? | No commande | Client             | Arrivée hausse | Échéance | Couleur     | Modèle  |
|----|----------|-------------|--------------------|----------------|----------|-------------|---------|
| 1  | 1        | 400589      | JRTH AMERICAIN SHC | 07-30-02       |          | BLACK-BLACK | AVENGER |
| 2  | 1        | 400621      | WALL MART          | 08-01-02       |          | BLACK-BLACK | AVENGER |
| 3  | 1        | 4005417     | BLAIN              | 08-14-02       |          | BLACK-BLACK | AVENGER |
| 4  | 1        | 4005418     | BLAIN              | 08-14-02       |          | BLACK-BLACK | AVENGER |
| 5  | 1        | 400681      | MILLS              | 09-01-02       |          | BLACK-BLACK | AVENGER |
| 6  | 1        | 400686      | MILLS              | 09-01-02       |          | BLACK-BLACK | AVENGER |
| 7  | 1        | 400687      | MILLS              | 09-01-02       |          | BLACK-BLACK | AVENGER |
| 8  | 1        | 400688      | MILLS              | 09-01-02       |          | BLACK-BLACK | AVENGER |
| 9  | 1        | 4006815     | MILLS              | 09-01-02       |          | BLACK-BLACK | AVENGER |
| 10 | 1        | 4006816     | MILLS              | 09-01-02       |          | BLACK-BLACK | AVENGER |
| 11 | 1        | 400738      | HART               | 09-01-02       |          | BLACK-BLACK | AVENGER |
| 12 | 1        | 400764      | JRTH AMERICAIN SHC | 09-05-02       |          | BLACK-BLACK | AVENGER |
| 13 | 1        | 400673      | SAAN               | 09-09-02       |          | BLACK-BLACK | AVENGER |
| 14 | 1        | 400781      | RED APPLE          | 09-09-02       |          | BLACK-BLACK | AVENGER |
| 15 | 1        | 400741      | JRTH AMERICAIN SHC | 09-15-02       |          | BLACK-BLACK | AVENGER |
| 16 | 1        | 400742      | JRTH AMERICAIN SHC | 09-15-02       |          | BLACK-BLACK | AVENGER |
| 17 | 1        | 400743      | JRTH AMERICAIN SHC | 09-15-02       |          | BLACK-BLACK | AVENGER |
| 18 | 1        | 400744      | JRTH AMERICAIN SHC | 09-15-02       |          | BLACK-BLACK | AVENGER |
| 19 | 1        | 400745      | JRTH AMERICAIN SHC | 09-15-02       |          | BLACK-BLACK | AVENGER |
| 20 | 1        | 400746      | JRTH AMERICAIN SHC | 09-15-02       |          | BLACK-BLACK | AVENGER |

ASTRO

Saisir les modifications :   
 Quelle ligne voulez-vous supprimer ?

**Figure 3. L'interface des commandes**

La Figure 4 présente l'interface permettant d'entrer les informations sur la machine. Une fois l'horaire de production calculé, la même fenêtre affiche les informations sur la production des divers blocs. On y retrouve la date de début de la production de ce bloc, sa durée en quart de travail, sa date de fin, l'échéance ainsi que la marge dont on dispose sur cette production. Afin d'éviter d'afficher trop d'informations, les données détaillées sur l'ordonnancement de chaque bloc sont imprimées sur des fichiers textes. Le logiciel permet également de simuler l'impact de l'ajout d'un quart de travail à une date donnée.

**Informations sur la machine**

8 Nombre de bras sur la machine ? 60 Cadence de la machine ? 1 Nb de quart de travail ? 03/01/02 Date de début ? mm/ji/aa

Moules de départ ? 12P Bras 1 13P Bras 2 1G Bras 3 2G Bras 4 Bras 5 Bras 6 Bras 7 Bras 8

|               | BLACK-CLEAR | BLACK-NAVY | NAVY-CLEAR | BLACK-MALIVE |
|---------------|-------------|------------|------------|--------------|
| Début         | 03-01-02    | 03-06-02   | 03-08-02   | 03-13-02     |
| Durée (quart) | 3,6         | 2,4        | 3,06       | 1,63         |
| Fin           | 03-06-02    | 03-08-02   | 03-13-02   | 03-15-02     |
| Échéance      | 07-30-02    | 07-30-02   | 07-30-02   | 07-30-02     |
| Marge (quart) | 104,4       | 102        | 98,94      | 97,31        |

Pour éviter les retards, un quart de travail additionnel devra commencer le :

Il est possible de mettre fin au quart de travail additionnel le :

Voulez-vous recalculer l'horaire de travail en fonction de l'ajout d'un quart de travail et préciser la date de début de ce quart ?

**Figure 4. Information sur la machine et ordonnancement des blocs**

Le logiciel développé a été testé à l'aide des données réelles concernant la production d'un modèle pour lequel 61 commandes ont été reçues. Ces commandes regroupaient 10 combinaisons de couleurs différentes, 11 dates d'échéances et 22 pointures. Pour réaliser l'ensemble des commandes de ce modèle, l'entreprise a dédié une machine à temps plein de mars à novembre 2002. La machine utilisée possède 8 bras et une cadence de production de 60 paires à l'heure. Les temps de réglage sont de 30 minutes pour chaque changement de moule ( $s_1=30$ ) et de 45 minutes pour chaque changement de couleur ( $s_2=45$ ). La production a débutée le 1<sup>er</sup> mars 2002

avec un seul quart de travail par jour. La méthode proposée termine la production le 7 octobre alors que l'entreprise a travaillé jusqu'à la fin novembre.

Cependant, il est difficile de comparer concrètement les résultats du logiciel avec les horaires produits par l'entreprise car nous n'avons pas pu obtenir l'information relative aux arrêts de la machine (retard ou absence des employés, bris des moules, ...). Les horaires générés par le logiciel ont cependant été présentés au directeur de la production de l'entreprise qui les a validés tout en attestant de leur faisabilité et de leur qualité.

Afin d'évaluer chacun des éléments constituant la méthode de résolution et leurs contributions à la performance du logiciel, quatre simulations ont été réalisées. Voici le détail des éléments de la méthode utilisés lors de ces simulations.

*Simulation 1* : Lors de cette simulation nous avons utilisé la procédure de regroupement des commandes (on considère chaque commande groupée comme un bloc séparé) ainsi que la procédure d'ordonnancement Multifit.

*Simulation 2* : Identique à la simulation 1 excepté que nous utilisons la procédure de formation de blocs de production présentée à la section 4, mais sans la méthode qui vise l'utilisation maximale de la capacité des bras.

*Simulation 3* : Cette simulation utilise les mêmes procédures que la simulation 2 mais l'étape d'ordonnancement est améliorée en ajoutant à la méthode Multifit les deux procédures qui prennent en considération les moules en place.

*Simulation 4* : Cette simulation ajoute à la précédente en incorporant la procédure pour l'utilisation maximale de la capacité des bras.

Pour chacune des simulations, nous avons calculé le nombre de blocs de production obtenu et la date de fin ainsi que les mesures de performances suivantes : nombre de jours ouvrable pour réaliser la production, nombre de blocs en retard, le nombre de commandes en retard multiplié par le nombre de jours où elles ont été en retard ainsi que le retard maximal obtenu (en jours ouvrable). Ces résultats sont présentés au Tableau 1.

**Tableau 1.** Résultats des simulations

|                                        | Simulation 1 | Simulation 2 | Simulation 3 | Simulation 4 |
|----------------------------------------|--------------|--------------|--------------|--------------|
| Nombre de blocs                        | 25           | 15           | 15           | 15           |
| Date de fin de la production           | 13 novembre  | 5 novembre   | 1 novembre   | 7 octobre    |
| Nombre de jours ouvrables              | 184          | 178          | 176          | 157          |
| Nombre de blocs en retard              | 5            | 4            | 3            | 0            |
| Jours×Nombre<br>de commandes en retard | 104          | 44           | 29           | 0            |
| Retard maximal                         | 10           | 10           | 8            | 0            |

Le Tableau 1 démontre clairement l'efficacité des diverses procédures développées. La procédure de formation des blocs (simulation 2) permet un gain de 6 jours ouvrables, gain obtenu grâce à la réduction des changements de couleurs. La procédure d'ajustement en fonction des moules en place (simulation 3) procure des améliorations plus faibles. Par contre, la procédure qui permet l'utilisation maximale de la capacité des bras (simulation 4) semble très performante en réduisant le nombre de jours de production de 176 à 157 et en éliminant tous les retards. Cela est dû au fait que cette procédure permet produire très rapidement toutes les petites commandes associées à des pointures ou des couleurs moins populaires. Lors des périodes subséquentes, le nombre de changements de moules est réduit et la capacité de la machine est mieux utilisée à la fabrication de grande séries.

## **Conclusion**

Nous avons proposé une méthode heuristique pour résoudre un problème d'ordonnancement difficile sur une machine multitâche. Étant donné l'importance des temps de réglage, l'approche développée cherche à réduire les temps de mise en route associés aux changements de couleurs et de moules. L'approche proposée a été testée sur les données d'une année de production d'une entreprise de fabrication de chaussures de la région de Québec. Les résultats sont parfaitement en accord avec les contraintes et objectifs de l'environnement de production étudié. Diverses simulations ont démontré l'efficacité des procédures développées. Un logiciel complet a été programmé et implanté en entreprise. Le logiciel est actuellement utilisé pour la planification courante de la production de l'année 2003.

## **Remerciements**

Cette recherche a été partiellement financée par les subventions OGP0036509 et OGP0172633 du Conseil de Recherche en Sciences Naturelles et en Génie du Canada (CRSNG) que nous remercions. Nous tenons aussi à remercier le président et directeur général de l'entreprise ainsi que le directeur de la planification pour leur précieuse collaboration tout au long de la réalisation de ce projet.

## **Références**

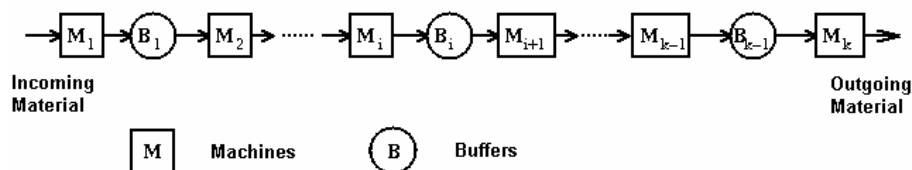
- Cheng, T.C.E. et Sin, C.C.S., 'A State-Of -The-Art Review of Parallel Machine Scheduling Research', *European Journal of Operational Research*, 47, 1990, 271-292.
- Cochran, J. K., Horng, Sh.-M. et Fowler, J. W., 'A Multi-Population Genetic Algorithm to Solve Multi-Objective Scheduling Problems for Parallel Machines', *Computers & Operations Research*, 30, 7, 2003, 1087-1102.
- Coffman E. G., Garey M. R. et Johnson D. S., 'An Application of Bin-Packing to Multiprocessor Scheduling', *SIAM Journal on Computing*, 7, 1978, 1-17.
- Garey, M. R., Graham, R. L. et Johnson, D. S., 'Performance Guarantees for Scheduling Algorithms', *Operations Research*, 26, 1978, 3-21.
- Hax, A. C. et Candea, D., 'Production and Inventory Management', Prentice-Hall Inc., 1984.
- Lenstra, J. K. et Rinnooy Kan, A. H. G., 'Complexity of Scheduling Under Precedence Constraints', *Operations Research*, 26, 1978, 22-35.
- Sun H. et Guoqing, W., 'Parallel Machine Earliness and Tardiness Scheduling with Proportional Weights', *Computers & Operations Research*, 30, 5, 2003, 801-808.
- Mokotoff E., 'An Exact Algorithm for the Identical Parallel Machine Scheduling Problem', à paraître dans *European Journal of Operational Research*.

## PERFORMANCE EVALUATION OF A SERIES-PARALLEL PRODUCTION LINE AND A SERIAL PRODUCTION LINE WITH UNRELIABLE BUFFERS – A COMPARATIVE STUDY

This paper addresses the issue of implementing a series-parallel production line for the purpose of increasing output and eliminating an intermediate buffer. Simulation and experimental design are applied to analyze and evaluate the performance of serial and series-parallel production lines. Different probability distributions were considered for the processing times that the machines composing the production line require. Results show that a parallel machine can be applied to serial production line when a downstream machine has a higher failure rate and lower repair rate than the adjacent upstream machine. When this situation arises the intermediate buffer between the two machines can be eliminated, and an additional machine is placed parallel to the downstream machine. Simulation results for two-stage and five-stage series-parallel production lines showed an increase in production output, a decrease in work-in-process, a reduction in line variability, and a reduction in blocked parts in the line compared to the serial production line. The reduction in production output variability means that daily production output could be more accurately predicted for a series-parallel line compared to the serial line. The simulation-based experimental design methodology outlined in this paper can be easily applied to a more complex manufacturing situation and informed decisions can be made on the most appropriate line configuration.

### Introduction

The manufacturing industry is striving to remain competitive. Manufacturers are aggressively trying to maximize output and profitability. The production line is of significant economic importance and must be designed to operate effectively and efficiently. This paper focuses on a discrete production system where distinct items are manufactured on a serial production line as illustrated in Figure 1. The squares represent machines and the circles represent buffers. Material moves in the direction of the arrows.



**Figure 1: Multi-Stage Serial Production Line**

Raw material flows from outside the work area to the first machine for processing. Once complete, the unfinished part moves to the adjacent buffer, and waits to be processed at the next machine in the sequence. Parts visit each machine and buffer exactly once in a fixed sequence. Each machine in the production line can be in two possible states: operational (up) or under repair (down). When a machine is operational and not starved or blocked, it can process material. The machine continues operating until it completes the part or a failure occurs. When a part is

completed, it is moved into the downstream buffer, if space is available. If a failure occurs, the machine must be repaired and is then unavailable for processing parts.

A machine is blocked when the downstream buffer is filled to capacity or it has failed. This prevents the machine from unloading its finished part, and stops further processing. Similarly, a machine is starved when the upstream buffer is empty of any parts or has failed. Unexpected equipment failure is the greatest cause of variation in a serial production line. Storage buffers are placed between machines to improve production line performance. Buffers mitigate the effects of variations caused by sudden machine breakdowns or high variation in processing times (Conway et al., 1988). Most research papers only consider buffers as storage spaces that are completely reliable. However, accumulating conveyors, automatic storage retrieval systems (AS/RS), and other systems can also be considered as buffers. These types of buffers are electro-mechanical systems and are subject to random failure adding further variability to the production output (Lipset et al., 1998 and Lipset et al., 1999).

In the study of serial production lines, most papers focus heavily on analytical methods involving the Markov chain for analyzing and designing serial production lines (Dallery and Gershwin, 1992). They focus on the use of buffers to increase production output and reduce variability. Markov chain models for production lines have two major limitations. Because they have large state spaces and they are not decomposable and approximation methods must be applied (Gershwin, 1994). Simulation, in conjunction with experimental design, can be effectively applied to analyze and design more complex manufacturing systems. A simulation-based experimental design methodology can be effectively applied to generate a relevant set of performance measures that can be used to design and analyze real manufacturing production lines (Abdul-Kader and Gharbi, 2002).

There are no papers that specifically address the possibility of applying a parallel machine to eliminate an intermediate buffer. It is believed that under special circumstances the installation of a parallel machine will be a more effective option compared to buffer allocation. This paper applies a simulation-based experimental methodology to conduct a comparative study between a serial and series – parallel production line and determine when parallel machines can be effectively used to eliminate an intermediate buffer and increase production output. In this research, we surveyed three main configurations: (1) serial line, (2) parallel machine at one stage, and (3) parallel machine at two different production stages.

### Problem Formulation

This section outlines the notation, working assumptions and performance measures that are applied in this simulation comparative study.

#### Notation

The machines of a series – parallel production line are denoted by  $M_{ij}$ , where  $i=1, 2, \dots, m$  and  $m$  refers to the number of serial machines and where  $j = 1, 2, \dots, k$ , and  $k$  refers to the number of machines in parallel. The basic problem is defined by the following parameters:

- $t_{ij}$ = mean processing time of machine  $M_{ij}$
- $p_{ij}$ = processing rate of machine  $M_{ij}$
- $MTTF_{ij}$ = mean time to failure of machine  $M_{ij}$
- $\lambda_{ij}$  = failure rate of machine  $M_{ij}$
- $MTTR_{ij}$ = mean time to repair of machine  $M_{ij}$
- $\mu_{ij}$ = repair rate of machine  $M_{ij}$

These parameters are related in the following way:

$$p_{ij} = 1/t_{ij} \quad (1)$$

$$\lambda_{ij} = 1/ \text{MTTF}_{ij} \quad (2)$$

$$\mu_{ij} = 1/ \text{MTTR}_{ij} \quad (3)$$

The buffer between each machine pair is denoted by  $B_i$  where  $i = 1, 2, \dots, m-1$  and the basic parameters for the isolated buffers are:

$\text{MTTF}_{B_i}$  = mean time to failure of buffer  $B_i$

$\sigma_i$  = failure rate of buffer  $B_i$

$\text{MTTR}_{B_i}$  = mean time to repair of buffer  $B_i$

$\tau_i$  = repair rate of buffer  $B_i$

$C_i$  = maximum size of buffer  $B_i$

These parameters are related in the following way:

$$\sigma_i = 1/ \text{MTTF}_{B_i} \quad (4)$$

$$\tau_i = 1/ \text{MTTR}_{B_i} \quad (5)$$

### Simulation Model Working Assumptions

The following is a list of assumptions regarding the serial and series-parallel production line simulation models:

- (a) There is an infinite raw material supply to the first machine therefore the first machine is never starved. Also, the last machine of the line is never blocked because there is an infinite buffer capacity provided for finished parts.
- (b) Only one product is produced in the production line, therefore no set-up of machines is required.
- (c) Each machine of the production line processes only one part at a time.
- (d) Standard probability distributions are applied to the machine processing times,  $t_{ij}$ . Most simulations assume exponential distribution.
- (e) The transfer, loading and unloading times are considered negligible.
- (f) Each machine is subject to accidental breakdown. Machine failures are assumed operation dependent with a failure rate,  $\lambda_{ij}$ , that is assumed exponentially distributed. The repair rate,  $\mu_{ij}$ , is also assumed exponentially distributed.
- (g) Each Buffer,  $B_i$  is subject to accidental breakdown. Buffer failures are assumed to be time dependent with a failure rate  $\sigma_i$  that is exponentially distributed. The buffer repair rate,  $\tau_i$ , is assumed to be exponentially distributed.
- (h) Intermediate buffers have finite capacity. Maximum buffer capacity is  $C_i$ .
- (i) Maintenance resources are unlimited and always available. Corrective maintenance on failed machines or buffers are performed on a first down - first repaired basis.
- (j) When a workstation consists of parallel machines, parts are transferred to the first available parallel machine  $M_{ij}$ .

## Performance Measures

There are a number of performance measures generated from the simulation output reports. The most important performance measures of consideration in this paper are:

PO – total production output of the production line

$BT_i$  – mean time spent in buffer

$MD_{ij}$  – total downtime for machine  $M_{ij}$

$BC_i$  – Average buffer contents

$T_b$  – Average time blocked

## Methodology

This section outlines the methodologies applied to simulate a series –parallel production line model.

### Simulation Model of Production Line

The flow of material through a multi-stage series - parallel production line is illustrated in the flowchart of Figure 2. The notation outlined earlier is followed in the illustration.

In the multi-stage series - parallel production line, each part starts in raw materials inventory. This storage location has infinite capacity as stated in assumption (a). Parts move through the serial stages ( $i = 1$  to  $m$ ) as outlined in Box 2 with initial  $j = 1$ .

A part first moves to Machine  $M_{ij}$ , if the machine is available to accept the part. The availability of Machine  $M_{ij}$  depends on whether it is processing another part, or it has failed and is under repair. If Machine  $M_{ij}$  is available (Box 3) then the processing of a part begins (Box 4). If Machine  $M_{ij}$  fails (Box 5) while it is processing a part, the machine will be repaired and the machine downtime  $MD_{ij}$  is recorded (Box 7). Once the machine has completed processing, and the time to process the part,  $t_{ij}$ , is measured (Box 6).

However, if Machine  $M_{ij}$  is unavailable and there is no parallel machine the part waits until that machine becomes available. If there is a parallel machine ( $j = 2$ ) then the part moves to that machine for processing if it is available (Box 11). If it is also not available then the part will await the first available parallel machine and the blocked time is recorded  $T_b$ .

Once the part is finished processing at Machine  $M_{ij}$ , the part maybe transferred into a buffer  $B_i$  if it is available. If the buffer  $B_i$  is down it will be repaired and the buffer downtime  $BD_i$  is recorded (Box 15). Also, if the buffer contents are less than the maximum buffer capacity  $C_i$  (Box 16) then the part can be placed into the buffer  $B_i$ , otherwise the part must wait  $T_b$  until space becomes available in the buffer (Box 17).

A part is transferred out of buffer  $B_i$  according to the First In – First Out (FIFO) rule and is moved to the next stage of the production line (Box 19). Once the part has passed through all the machine stages of the production line ( $i = m$ ), the part leaves the production line and is placed in finished goods inventory ready for shipment. It is counted as production output (PO) in Box 20.

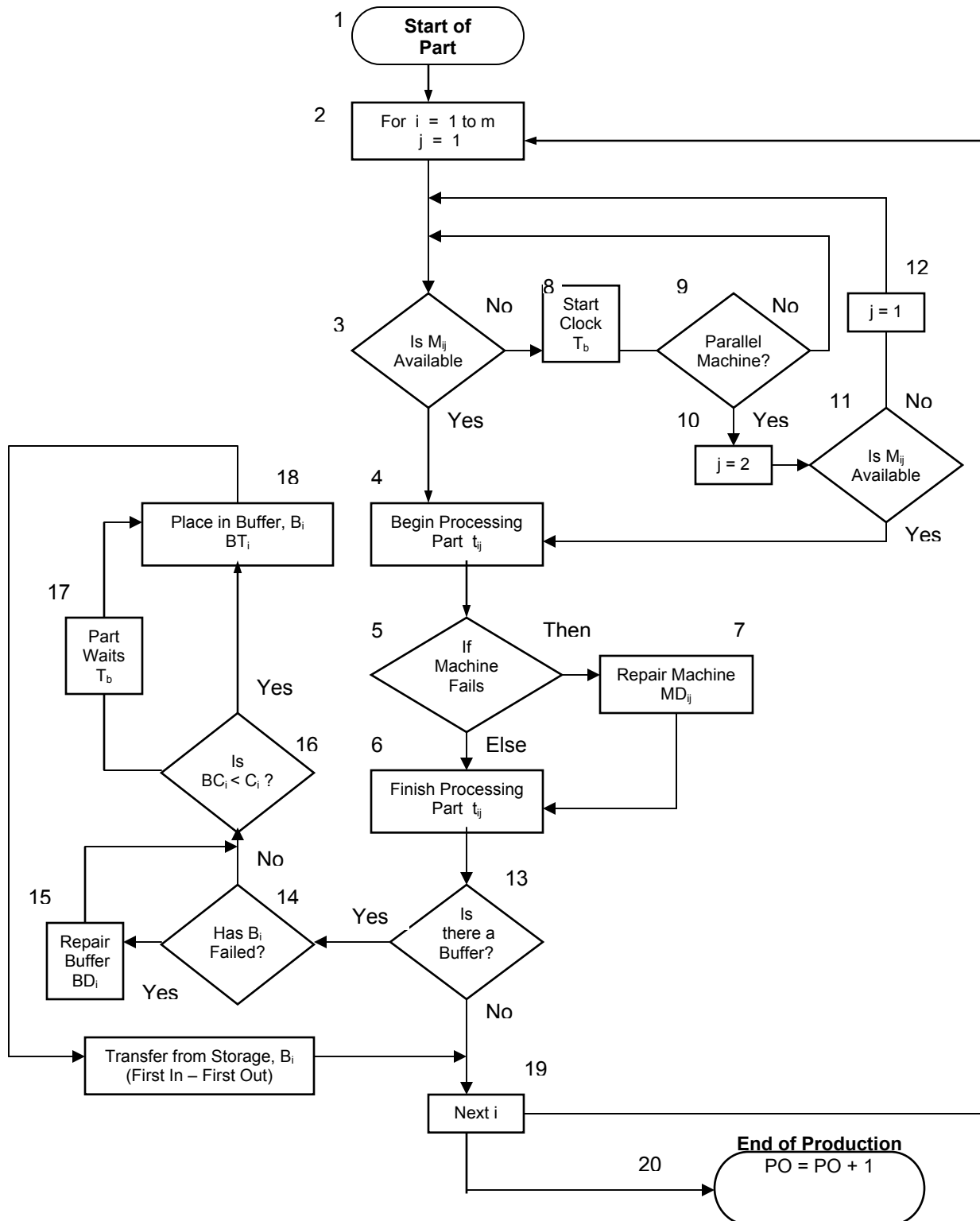


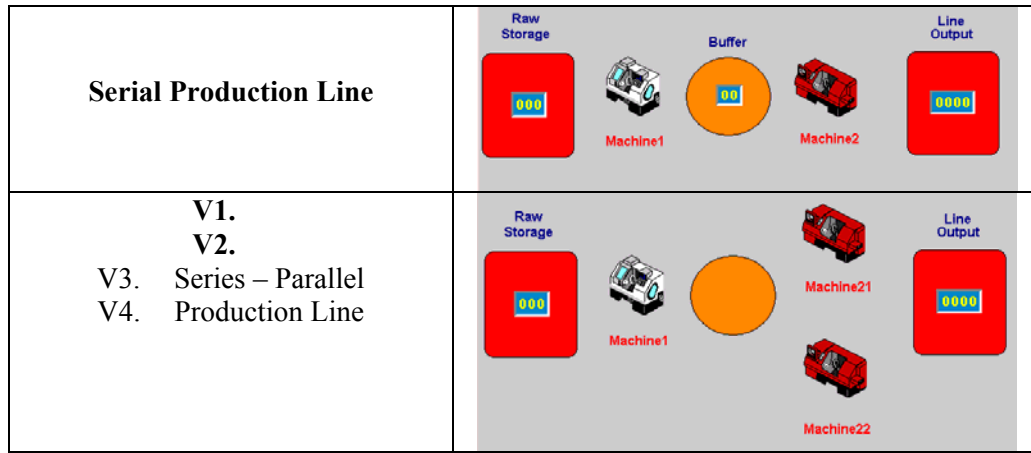
Figure 2: Series - Parallel Production Line Simulation Model Flowchart

## Case Study

The simplest form of serial production line is a two machine – one buffer line. It has received a great deal attention from researchers such as Buzacott (1972), Gershwin and Berman (1981), and Lipset et al. (1998). In this section, the performance measures acquired from the simulation model will be compared for a two-stage serial production line and a series-parallel production line. The simulation methodology is then applied to a longer and more complex system to determine if results are comparable.

### Two – Stage Model Comparisons

A simulation model composed of two machines and one buffer was constructed using a commercial package, ProModel. The two-machine-one buffer serial production line was modified into a series – parallel production line. The intermediate buffer was eliminated and a parallel machine,  $M_{22}$  was added at the second stage of the production line. Both production line models are illustrated in Figure 3.



**Figure 3: Two-Stage Production Line Models**

The input parameters applied to both simulation models are outlined in Tables 1 and 2. Exponential distribution was used to represent the failure and repair rates that occur randomly for the machines and buffer. There are a number of standard probability distributions that can be applied to represent machine processing times depending on the type of manufacturing operation. Table 2 outlines four standard probability distributions and two user-defined distributions that are applied in the simulations for comparison.

**Table 1: Input Failure and Repair Rate Parameters**

|                          | Mean<br>Failure Rate             | Mean<br>Repair Rate          |
|--------------------------|----------------------------------|------------------------------|
| <b>Serial</b>            |                                  |                              |
| Machine $M_{11}$         | $\lambda_{11} = 2$ failures / hr | $\mu_{11} = 12$ repairs / hr |
| Buffer $B_1$             | $\sigma_1 = 2$ failures / hr     | $\tau_1 = 10$ repairs / hr   |
| Machine $M_{21}$         | $\lambda_{21} = 3$ failures / hr | $\mu_{21} = 6$ repairs / hr  |
| <b>Series - Parallel</b> |                                  |                              |
| Machine $M_{11}$         | $\lambda_{11} = 2$ failures / hr | $\mu_{11} = 12$ repairs / hr |
| Machine $M_{21}$         | $\lambda_{21} = 3$ failures / hr | $\mu_{21} = 6$ repairs / hr  |
| Machine $M_{22}$         | $\lambda_{22} = 3$ failures / hr | $\mu_{22} = 6$ repairs / hr  |

**Table 2: Input Processing Time Distribution Parameters**

|   | Processing Time Distribution | $M_{1j}$ Processing Time (min)<br>$t_{1j}$ | $M_{2j}$ Processing Time (min)<br>$t_{2j}$ |
|---|------------------------------|--------------------------------------------|--------------------------------------------|
| 1 | Exponential Distribution     | Mean = 1.5                                 | Mean = 1.2                                 |
| 2 | Constant                     | 1.5                                        | 1.2                                        |
| 3 | Uniform Distribution         | Mean = 1.5 Half Range = 0.85               | Mean = 1.2 Half Range = 0.65               |
| 4 | Normal Distribution          | Mean = 1.5 Std. Dev. = 0.72                | Mean = 1.2 Std. Dev. = 0.58                |
| 5 | User Defined Distribution #1 | See Table 3                                | See Table 3                                |
| 6 | User Defined Distribution #2 | See Table 4                                | See Table 4                                |

**Table 3: User Defined Distribution #1**

| $M_{1j}$ Processing Time (min) |       | $M_{2j}$ Processing Time (min) |       |
|--------------------------------|-------|--------------------------------|-------|
| Percentage                     | Value | Percentage                     | Value |
| 0                              | 0.4   | 0                              | 0.3   |
| 10                             | 0.8   | 15                             | 0.9   |
| 20                             | 1.2   | 30                             | 1.2   |
| 40                             | 2.3   | 20                             | 1.4   |
| 30                             | 3.0   | 35                             | 1.8   |
| 0                              | 3.5   | 0                              | 2.6   |

**Table 4: User Defined Distribution#2**

| $M_{1j}$ Processing Time (min) |       | $M_{2j}$ Processing Time (min) |       |
|--------------------------------|-------|--------------------------------|-------|
| Percent                        | Value | Percent                        | Value |
| 0                              | 0.5   | 0                              | 0.2   |
| 20                             | 1.0   | 10                             | 0.8   |
| 15                             | 1.2   | 40                             | 1.3   |
| 35                             | 1.7   | 35                             | 1.7   |
| 30                             | 2.6   | 15                             | 2.2   |
| 0                              | 3.5   | 0                              | 2.8   |

The designed experiment for the serial production line model was composed of one factor (buffer) with 8 levels. The parameters from Table 1 were applied with exponentially distributed processing times from Table 2. The buffer capacity ( $C_1$ ) was varied from 1 to 35. Simulations for the serial production line model were run with a reliable buffer ( $\sigma_1 = 0$ ,  $\tau_1 = 0$ ) and then with an unreliable buffer ( $\sigma_1 = 2$ ,  $\tau_1 = 10$ ). Each model was run for a 500-hour warm-up period to ensure a steady-state condition, followed by a simulation run period of 2,500 hours for five replications. The total production output results for the serial production line with a reliable and unreliable buffer are shown in Table 5. The simulation results for the series - parallel line are shown in Table 6.

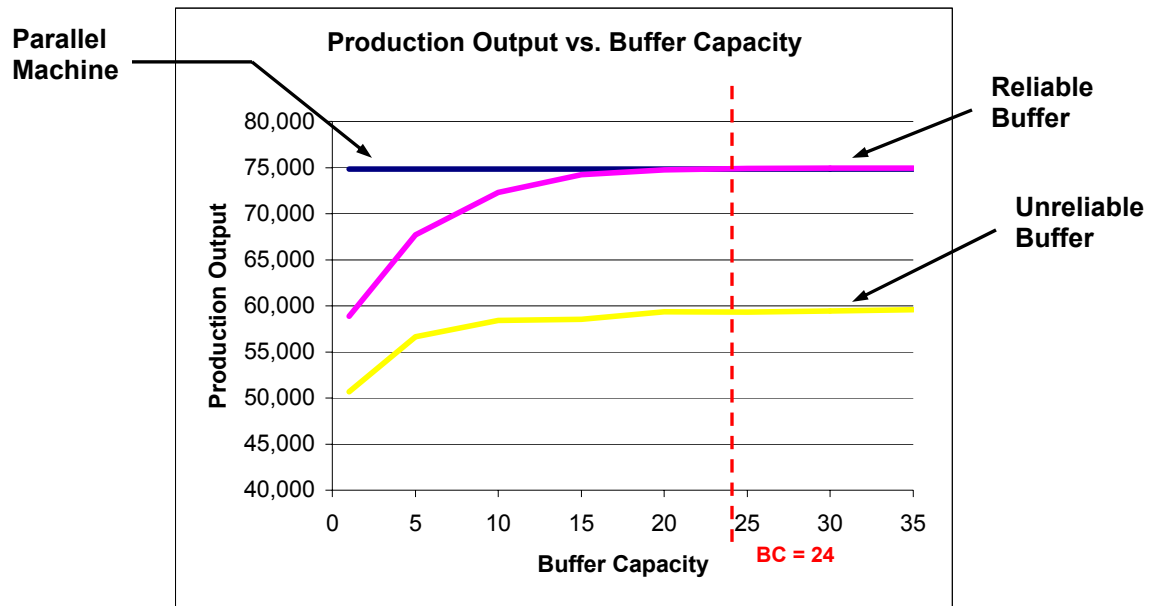
**Table 5: Production Output Results with Serial Production Line**

| Buffer Size | Reliable Buffer Output | Unreliable Buffer Output |
|-------------|------------------------|--------------------------|
| 1           | 58861                  | 50670                    |
| 5           | 67688                  | 56658                    |
| 10          | 72311                  | 58413                    |
| 15          | 74238                  | 58537                    |
| 20          | 74768                  | 59370                    |
| 25          | 74901                  | 59338                    |
| 30          | 74927                  | 59424                    |
| 35          | 74962                  | 59577                    |

**Table 6: Production Output for Series - Parallel Line**

| Line Configuration   | Production Output |
|----------------------|-------------------|
| Series-Parallel Line | 74845             |

Results showed that the production output increased dramatically for buffer capacities between 1 and 10. Between buffer capacities of 10 and 35, the production output levels off in an asymptotic fashion. This is illustrated in Figure 4.

**Figure 4: Production Output vs. Buffer Capacity**

According to the simulation results of Figure 4, an unreliable buffer can dramatically lower the production output of a serial production line compared to the same production line with a reliable buffer. This is not surprising because an unreliable buffer adds another level of variability to a production line due to random failure and repair. No matter how much the buffer capacity is increased, the output will never reach the level of the reliable buffer line. For example, at a buffer capacity of 35 the production output for the unreliable buffer line is 59,577, while the reliable buffer line is at 74,962.

Simulation results illustrated in Figure 4 also showed that the production outputs of the serial production line and series – parallel lines intersect when the serial line buffer capacity reaches 24. At buffer capacities less than 24, the series – parallel line has the greatest production output capability, while with buffer capacities greater than 24, the serial production line outperforms the series – parallel production line. To ensure that these results are consistent under different processing conditions, the simulation models were run with a reliable buffer using the processing time probability distributions of Table 2. The results are tabulated in Tables 7 and 8.

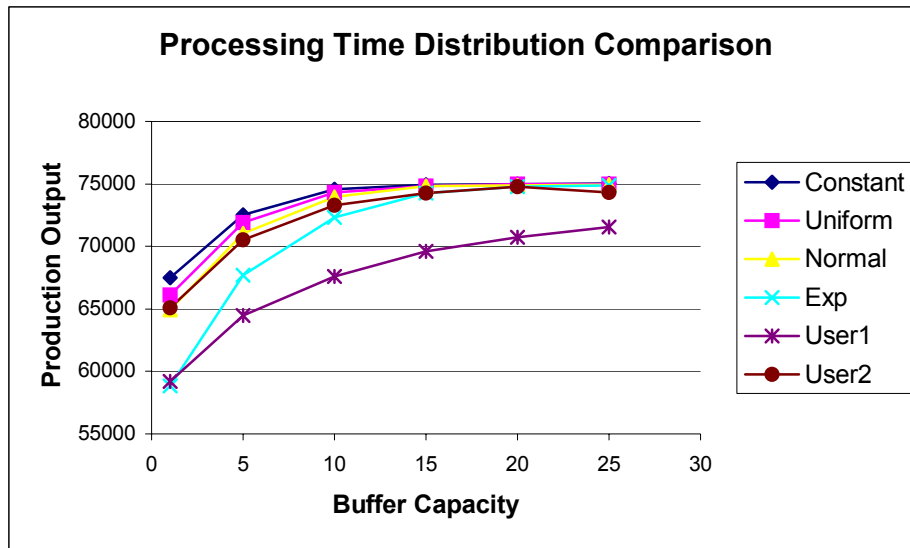
**Table 7: Serial Production Line Output Results for Different Processing Time Distributions**

|                 | Total Production Output (PO) |          |                      |                     |                              |                              |
|-----------------|------------------------------|----------|----------------------|---------------------|------------------------------|------------------------------|
| Buffer Capacity | Exponential Distribution     | Constant | Uniform Distribution | Normal Distribution | User Defined Distribution #1 | User Defined Distribution #2 |
| 1               | 58861                        | 67499    | 66093                | 64936               | 59199                        | 65068                        |
| 5               | 67688                        | 72525    | 71928                | 71040               | 64453                        | 70528                        |
| 10              | 72311                        | 74555    | 74335                | 73972               | 67597                        | 73270                        |
| 15              | 74238                        | 74905    | 74806                | 74816               | 69595                        | 74281                        |
| 20              | 74768                        | 74959    | 75004                | 74885               | 70711                        | 74794                        |
| 25              | 74901                        | 75015    | 74987                | 74945               | 71557                        | 74338                        |

**Table 8: Series – Parallel Production Line Output Results for Different Processing Time Distributions**

| Total Production Output (PO) |          |                      |                     |                              |                              |
|------------------------------|----------|----------------------|---------------------|------------------------------|------------------------------|
| Exponential Distribution     | Constant | Uniform Distribution | Normal Distribution | User Defined Distribution #1 | User Defined Distribution #2 |
| 74845                        | 74998    | 74995                | 75001               | 70766                        | 75005                        |

The total production output results from Table 7 are plotted in Figure 6. The graph characteristics for each different distribution are clearly similar. All plots show that the production output levels off in an asymptotic fashion as the buffer capacity increases. The constant and uniform distributions show higher production output, while the exponential and user defined #1 distributions exhibit lower production output due to greater variability.

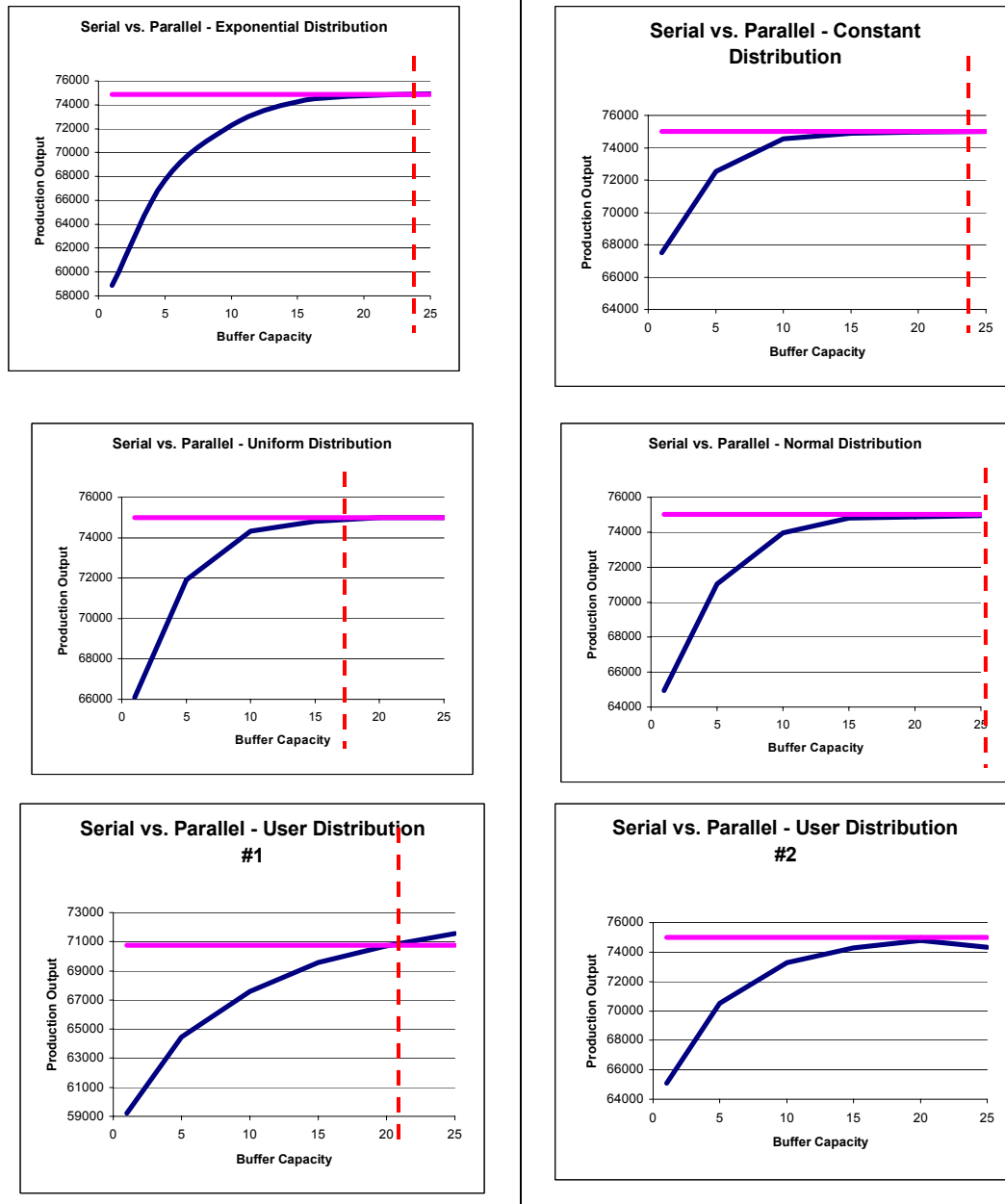


**Figure 5: Processing Time Distribution Comparison**

The simulation results were plotted in Figure 6 for the two production lines to determine the crossover point for each processing time distribution. Results showed that crossover points range from buffer capacities of 18 to 25. It is clearly evident that the selection of probability distribution can impact the crossover point for determining when a parallel machine can be applied and the intermediate buffer eliminated.

The simulation results outlined in Tables 5 and 6 only provided the total production output for the two production lines. It did not provide any indication to the variance, which is important for predicting daily or weekly production (Milteneburg, 1987). To compare the variance of both line configurations, simulations were run for the serial and series – parallel production lines with exponentially distribution processing, failure, and repair rates. Simulations were run for 10,000 hours and the production output was collected for time intervals of 480 minutes (approximately an 8 hour day). A buffer capacity of 24 was used for the serial production line so the results would be comparable between the serial and series – parallel production lines. The production output mean and variance are tabulated in Table 9.

The mean production outputs for both line configurations are approximately the same, but there is a noticeable difference in variance. The output variability for the serial production line is much greater than that of the series – parallel line with no intermediate buffer. It can be concluded that it is much easier to predict daily production output for the series – parallel production line compared to the serial production line.



**Figure 6: Crossover Point Comparison for Different Processing Time Distributions**

**Table 9: Two-Stage Production Mean and Standard Deviation Results**

| Line Configuration       | Output Mean / day | Variance / day | Output Standard Deviation / day |
|--------------------------|-------------------|----------------|---------------------------------|
| Two Machine – One Buffer | 239.69            | 495.51         | 22.26                           |
| Series - Parallel        | 239.41            | 292.07         | 17.09                           |

## Experimental Design for Contributing Factors

There are seven factors that can be considered as impacting the production output (PO) of a series – parallel manufacturing production line. A two-level seven-factors full factorial ( $2^7$ ) experiment was applied to determine which of the seven factors were most significant. These seven factors were set at two levels: a low and a high. The line configuration factor is a qualitative factor where the serial production line represented the low level, while the series – parallel line represented the high level. The two stage serial production line of Figure 3 was simulated using a buffer capacity of 24. The processing, failure, and repair rates were all assumed to be exponential distributed. The seven factors and two levels are tabulated in Table 10.

**Table 10: Factors and Levels for Full Factorial Experiment**

| Factor                                                                               | Units   | Low Level (-) | High Level (+)    |
|--------------------------------------------------------------------------------------|---------|---------------|-------------------|
| Line Configuration                                                                   | Type    | Serial        | Series - Parallel |
| MTTF <sub>11</sub>                                                                   | Minutes | 20            | 40                |
| MTTR <sub>11</sub>                                                                   | Minutes | 2             | 8                 |
| MTTF <sub>21</sub> / MTTF <sub>22</sub>                                              | Minutes | 10            | 30                |
| MTTR <sub>21</sub> / MTTR <sub>22</sub>                                              | Minutes | 5             | 15                |
| M <sub>11</sub> Processing Time, t <sub>11</sub>                                     | Minutes | 1.3           | 1.7               |
| M <sub>21</sub> / M <sub>22</sub> Processing Time, t <sub>21</sub> , t <sub>22</sub> | Minutes | 1             | 1.4               |

The two-level seven-factors full-factorial experimental study consisted of  $2^7 = 128$  experiments. Each simulation experiment was run for a 500 hour warm-up period followed by a run period of 2,500 hours for five replications and the production output (PO) was recorded for each experiment. Analysis of variance (ANOVA) was performed on the production output results of the 128 experiments. The overall regression and analysis of variance is presented in Table 8. The regression analysis reports an  $R^2 = 0.94$ , which indicates a good fit. The F ratio is reasonably high and equal to 87.02.

**Table 10: Regression and Analysis of Variance**

|                         |        |
|-------------------------|--------|
| Multiple R              | 0.9722 |
| R <sup>2</sup>          | 0.9452 |
| Adjusted R <sup>2</sup> | 0.9343 |
| Standard Error          | 3.1198 |
| Observations            | 128    |

---

|            | df  | SS         | MS        | F Ratio | P        |
|------------|-----|------------|-----------|---------|----------|
| Regression | 21  | 8406724183 | 400320199 | 87.02   | < 0.0001 |
| Residual   | 106 | 487639045  | 4600368   |         |          |
| Total      | 127 | 8894363228 |           |         |          |

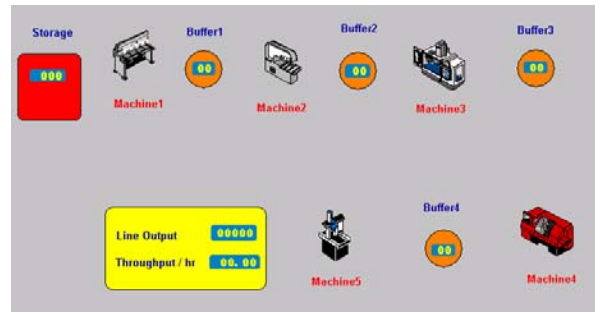
Experimental results showed that the series–parallel production line had a higher production output compared to the serial production line in 37 out of 64 experiments with an average increase of 5,484. The serial production line only had a production output higher than the series – parallel production line in 25 out of the 64 experiments and only had an average increase of 1,797 over the series – parallel production line.

From the study of the experimental and ANOVA results the following conclusions were made. A parallel machine can be applied to a serial production line when:

- 1)  $M_{21}$  has a higher failure rate than  $M_{11}$  ( $\lambda_{21} > \lambda_{11}$ ),
- 2)  $M_{21}$  has a lower repair rate than  $M_{11}$  and processing rates for machines  $M_{11}$  and  $M_{21}$  are near equal ( $\mu_{21} < \mu_{11}$  and  $p_{11} \approx p_{21}$ )

### Five-Stage Model Comparisons

The comparison of simulation results for the two – stage serial and series – parallel productions lines showed that a parallel machine could successfully be applied to increase production output and reduce variance. To determine if parallel machines could be applied to longer production lines, a simulation model of a five-machine–four-buffer serial production line was developed as illustrated in Figure 7 and the input parameters are outlined in Table 11. The processing, failure, and repair rates for all machines are assumed exponentially distributed and all buffers are reliable with buffer capacities of 5 parts.

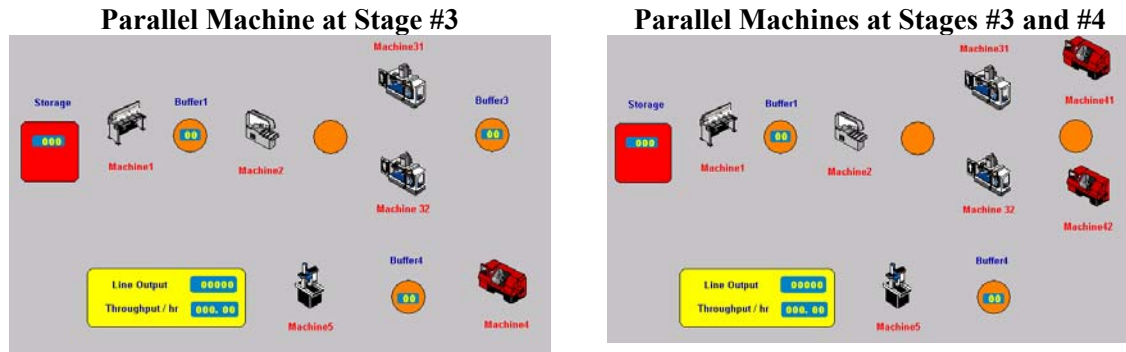


**Figure 7: Five-Machine–Four Buffer Serial Production Line Simulation Model**

**Table 11: Input Parameters for Five-Stage Simulation Model**

| Machine  | Processing Rate            | Failure Rate                        | Repair Rate                   |
|----------|----------------------------|-------------------------------------|-------------------------------|
| $M_{11}$ | $p_{11} = 46.2$ parts / hr | $\lambda_{11} = 0.6$ failures / hr  | $\mu_{11} = 12$ repairs / hr  |
| $M_{21}$ | $p_{21} = 40$ parts / hr   | $\lambda_{21} = 0.5$ failures / hr  | $\mu_{21} = 10$ repairs / hr  |
| $M_{31}$ | $p_{31} = 50$ parts / hr   | $\lambda_{31} = 0.75$ failures / hr | $\mu_{31} = 7.5$ repairs / hr |
| $M_{41}$ | $p_{41} = 54.5$ parts / hr | $\lambda_{41} = 1.0$ failures / hr  | $\mu_{41} = 6$ repairs / hr   |
| $M_{51}$ | $p_{51} = 46.2$ parts / hr | $\lambda_{51} = 0.5$ failures / hr  | $\mu_{51} = 10$ repairs / hr  |

For this production line,  $M_{31}$  and  $M_{41}$  have higher failure rates and lower repair rates compared to their adjacent upstream machines. According to the experimental design results for a two – stage production line they are both candidates for implementing a parallel machine, while eliminating the preceding buffer. The five–stage serial production line model was first modified with the removal of  $B_2$ . An identical parallel machine ( $M_{32}$ ) was then incorporated at Stage #3. To determine if parallel machines can be applied back-to-back, the model was further modified with the installation of another identical parallel machine ( $M_{42}$ ) at Stage #4 and Buffer 3,  $B_3$ , was removed from the system. These simulation models are illustrated in Figure 8.



**Figure 8: Five-Stage Series-Parallel Simulation Models**

Each simulation model was run for a 2,500-hour warm-up period, followed by a run period of 7,500 hours for five replications. The total production output was collected for the 7,500-hour period and the results are shown below in Table 12.

**Table 12: Performance Measures for Three Line Configurations**

| Line Configuration |                                    | Total Production Output (PO) | Total Average Buffer Contents (BC <sub>i</sub> ) | Total Average Minutes Part Blocked (T <sub>bi</sub> ) |
|--------------------|------------------------------------|------------------------------|--------------------------------------------------|-------------------------------------------------------|
| Line #1            | Serial Line                        | 154,564                      | 9.10                                             | 8.30                                                  |
| Line #2            | Parallel Machine at Stage #3       | 233,824                      | 6.95                                             | 7.14                                                  |
| Line #3            | Parallel Machine at Stages #3 & #4 | 243,065                      | 5.11                                             | 5.73                                                  |

The longer production line results coincide with the results of the two – stage production line. The production output increases with the incorporation of parallel machines at machines M<sub>32</sub> and M<sub>42</sub>. The number of parts waiting in the intermediate storage decreases with the removal of B<sub>2</sub> and B<sub>3</sub>. The most interesting trend is that the average time that a part is blocked decreases, even with the elimination of the intermediate buffers.

The daily production output variance for each model was also compared. The simulation models were run for 10,000 hours and the production output was collected for time intervals of 480 minutes (approximately an 8 hour day). The production output mean and variance are tabulated in Table 13. Again, the results coincide with the results of the two – stage line with less output variability for the series – parallel production lines compared to the serial production line.

**Table 13: Five – Stage Production Mean and Standard Deviation Results**

| Line Configuration                                    | Output Mean / day | Variance / day | Output Standard Deviation / day |
|-------------------------------------------------------|-------------------|----------------|---------------------------------|
| Serial Line                                           | 246.31            | 350.44         | 18.72                           |
| Parallel Machine at M <sub>3</sub>                    | 250.05            | 303.46         | 17.42                           |
| Parallel Machine at M <sub>3</sub> and M <sub>4</sub> | 256.17            | 244.30         | 15.63                           |

## Conclusion

A simulation approach coupled with experimental design to increase production output and reduce variability of a serial production line has been applied. Tests were conducted to evaluate buffer contribution compared to series – parallel machines configuration. Based on some scenarios and through the use of simulation-based experimentation, it has been shown that a parallel machine can be applied to replace an intermediate buffer. A parallel machine is most applicable when a machine has a higher failure rate and lower repair rate than the adjacent upstream workstation. Results show that a parallel machine can be applied for short and long production lines to increase production output, decrease work-in-process (WIP), and reduce line variability. The simulation-based methodology outlined in this paper can be easily applied in the design and analysis of other more complex manufacturing situations in determining the most viable production line configuration.

## References

- Abdul-Kader, Walid and A. Gharbi, 2002. Capacity Estimation of a Multi-Product Unreliable Production Line. *International Journal of Production Research*, Vol. 40, No. 18, 4815-4834.
- Buzacott, J.A, 1972. The Effect of Station Breakdown and Random Processing Times on the Capacity of Flow Lines with In-process Storage. *AIIE Transactions*, **4** (4) 308-312.
- Conway, Richard, William Maxwell, John O. McClain, and L. Joseph Thomas, 1988. The Role of Work-In-Process Inventory in Serial Production Lines. *Operations Research*, **36** (2), 229-241.
- Dallery, Yves, and Stanley B. Gershwin, 1992. Manufacturing Flow Line Systems: A Review of Models and Analytical Results. *Queueing Systems*, **12**, 3-94.
- Gershwin, Stanley B. Manufacturing Systems Engineering. Englewood Cliffs: Prentice-Hall, 1994.
- Gershwin, Stanley B., Oded Berman, 1981. Analysis of Transfer Lines Consisting of Two Unreliable Machines with Random Processing Times and Finite Storage Buffers. *AIIE Transactions*, **13** (1), 2-11.
- Lipset, Robert, Robert P. Van Til, and Sankar Sengupta, 1998. Development of a Model for a Two-Station Serial Transfer Line Subject to Machine and Buffer Failure. *Mathematical and Computer Modelling of Dynamical Systems* **4** (3), 231-246.
- Lipset, Robert, Robert P. Van Til, and Sankar Sengupta, 1999. Steady-State Performance Analysis of Serial Transfer Lines Subject to Machine and Buffer Failure. *IEEE Transactions on Automatic Control*, **44** (2), 319-327.
- Miltenburg, G. J., 1987. Variance of the Number of Units Produced on a Transfer Line with Buffer Inventories during a Period of Length T. *Naval Research Logistics*, **34**, 811-822.

**THE EMERGING INTERDISCIPLINARY FIELD OF E-COMMERCE: HIGHLY-CITED DOCUMENTS, AUTHORS AND JOURNALS**

Electronic Commerce (E-Commerce) describes the manner in which transactions take places over electronic networks, mostly over the Internet. It includes the process of supplying, buying and selling goods, services, and information electronically. Since the publication of the book, entitled: *Electronic Commerce: A Manager's Guide* by Kalakota and Whinston in 1996, many publications about E-Commerce have sprung up in various journals on different continents. Given the rapid growth of E-Commerce research, we use bibliometric epistemology to sketch-out the emerging knowledge network of E-Commerce and to develop a perspective on the generation and diffusion process of E-Commerce as a field of research and enquiry. The development path of the emerging interdisciplinary field of E-Commerce clearly points to the beginning of E-Commerce as an interdisciplinary and comprehensive field, particularly in its formatory stage. Of the six properties of knowledge or knowing (Latour 1987) -- the "where," the "when," the "how," the "what," the "why," and by "whom," the first four of them are explored and results are presented in the paper. Specifically, the paper identifies the most popular and highly cited E-Commerce documents (including books and journals), researchers and journals.