

ÉCOLE DE TECHNOLOGIE SUPÉRIEURE
UNIVERSITÉ DU QUÉBEC

MÉMOIRE PRÉSENTÉ À
L'ÉCOLE DE TECHNOLOGIE SUPÉRIEURE

COMME EXIGENCE PARTIELLE
À L'OBTENTION DE LA
MAÎTRISE EN GÉNIE DE LA PRODUCTION AUTOMATISÉE
M.Ing.

PAR
HOURMILOUGUÉ GUILLAUME

COMPARAISON DE MÉTHODES
D'ASSIGNATION DE DATES D'EXIGIBILITÉ DANS UN PROCESSUS DE
DÉSASSEMBLAGE/ASSEMBLAGE

MONTRÉAL, LE 10 DÉCEMBRE 2007

© Droits réservés de Hourmilougué Guillaume

CE MÉMOIRE A ÉTÉ ÉVALUÉ
PAR UN JURY COMPOSÉ DE :

M. Amar Ramudhin, directeur de mémoire
Génie de la production automatisée à l'École de technologie supérieure

M. Marc Paquet, codirecteur de mémoire
Génie de la production automatisée à l'École de technologie supérieure

M. Michel Rioux, président du jury
Génie de la production automatisée à l'École de technologie supérieure

M. Jean-Pierre Kenné, membre du jury
Génie mécanique à l'École de technologie supérieure

IL A FAIT L'OBJET D'UNE SOUTENANCE DEVANT JURY ET PUBLIC
LE 10 DÉCEMBRE 2007
À L'ÉCOLE DE TECHNOLOGIE SUPÉRIEURE

COMPARAISON DES MÉTHODES D'ASSIGNATION DE DATES D'EXIGIBILITÉ DANS UN PROCESSUS DE DÉSASSEMBLAGE/ASSEMBLAGE

HOURMILOUGUÉ Guillaume

SOMMAIRE

Les systèmes de désassemblage/assemblage traitent un produit au travers d'une séquence de démontage et puis une séquence d'assemblage. Ils sont fréquents dans les industries d'entretien, de réparation et de révision. La planification et l'ordonnancement sont notoirement difficiles dans ces systèmes parce que la nature du travail à faire est incertaine et n'est généralement pas connue avant que le produit soit démonté. Ceci couplé au fait que les dates d'exigibilité sont fixées avant le démontage de produit complique la tâche des directeurs d'entreprise qui cherchent à satisfaire à temps les commandes des clients. On estime qu'un mécanisme approprié fixant des dates d'exigibilité devrait faciliter la planification et l'ordonnancement. Ce mémoire décrit d'abord le contexte et les questions générales au sujet de la réfection. Puis, ce projet passe en revue les règles d'assignation de date d'exigibilité les plus usitées, qui sont ensuite adaptées au contexte du processus de désassemblage/assemblage. De nouvelles méthodes d'assignation de date d'exigibilité sont présentées pour corriger l'erreur commise lors de l'adaptation des règles traditionnelles au contexte de la réfection. L'exécution de ces règles est minutieusement examinée par la simulation. On constate que la performance des règles change considérablement et dépend de la charge de travail de l'atelier, de la capacité, et de la variabilité inhérente dans des durées de la transformation. L'analyse statistique de ces comportements est approfondie en avant pour mesurer plus précisément les influences des différents paramètres.

COMPARAISON DES MÉTHODES D'ASSIGNATION DE DATES D'EXIGIBILITÉ DANS UN PROCESSUS DE DÉSASSEMBLAGE/ASSEMBLAGE

HOURMILOUGUÉ Guillaume

ABSTRACT

Disassembly/assembly systems process a product through a disassembly sequence and then an assembly sequence. They are common in the maintenance, repair and overhaul industry. Planning and scheduling are notoriously hard in these systems because the nature of the work to be done is uncertain and is generally not known before the product is disassembled. This coupled with the fact that due dates are set prior to product disassembly make it difficult for managers to satisfy customer orders on time. It is felt that a more appropriate due date setting mechanism should facilitate planning and scheduling. This paper first describes the context and general issues about remanufacturing and reviews the most common due date setting rules. Some of these rules are then adapted to the context of disassembly/assembly shop. New due date assignment methods are also introduced. Performance of these rules is thoroughly tested through simulation. It is found that the performance of the rules varies greatly and is dependent on the shop's workload, capacity, and the inherent variability in processing times. Further statistical analysis of these behaviours is set to investigate more accurately the influences of the different parameters.

REMERCIEMENTS

Je voudrais tout d'abord remercier les professeurs Amar Ramudhin, Ph.D. et Marc Paquet, Ph.D. qui m'ont conseillé et épaulé tout au long de ce projet. Ce projet n'aurait pu aboutir sans leur concours. Je leur suis très reconnaissant de leur aide.

Je voudrais aussi remercier tous les membres du Laboratoire de recherche sur les chaînes d'approvisionnement (LRCA). Je ne pourrais jamais les remercier assez tant leurs avis et leur aide m'ont été précieux. Chacun a su créer pour moi un environnement propice à la recherche et m'apporter ses suggestions.

Enfin, je souhaite remercier tous mes amis et mes proches et plus particulièrement mes parents et mon frère qui ont été pour moi un soutien formidable tout au long de cette maîtrise en génie de la production automatisée.

TABLE DES MATIÈRES

| | Page |
|---|------|
| SOMMAIRE | i |
| ABSTRACT | ii |
| REMERCIEMENTS..... | iii |
| LISTE DES TABLEAUX..... | viii |
| LISTE DES FIGURES | ix |
| LISTE DES ABRÉVIATIONS ET SIGLES | xi |
| INTRODUCTION | 1 |
| CHAPITRE 1 CONTEXTE ET PROBLÉMATIQUE | 3 |
| 1.1 Contexte général | 3 |
| 1.2 Contexte économique..... | 5 |
| 1.3 Contexte de qualité | 7 |
| 1.4 Contexte environnemental | 8 |
| 1.5 Trois grandes familles d'activités | 9 |
| 1.6 Incertitudes d'un système de MRO..... | 10 |
| 1.6.1 Incertitude de temps et de quantité de retour | 10 |
| 1.6.2 Besoin d'équilibre entre les retours et la demande | 11 |
| 1.6.3 Désassemblage des produits retournés..... | 12 |
| 1.6.4 Incertitude sur les matériaux des produits retournés..... | 13 |
| 1.6.5 Besoin d'un réseau logistique inverse..... | 14 |
| 1.6.6 Complication des restrictions d'assortiments de matériel | 15 |
| 1.6.7 Routages stochastiques et temps d'opération hautement variables | 16 |
| 1.6.8 Diverses sources d'incertitudes..... | 17 |
| CHAPITRE 2 PROCESSUS DE DÉSASSEMBLAGE/ASSEMBLAGE | 18 |
| 2.1 Désassemblage..... | 18 |
| 2.1.1 Modélisation du désassemblage..... | 18 |
| 2.1.2 Planification du désassemblage | 22 |
| 2.1.3 Sommaire | 23 |
| 2.2 Description des étapes principales d'un PD/A..... | 24 |
| 2.3 Préviation des résultats d'inspections | 27 |
| 2.4 Normes de la nomenclature | 29 |
| 2.5 Intégration des tests et des inspections | 32 |
| 2.6 Problématique | 36 |
| CHAPITRE 3 LES MÉTHODES D'ASSIGNATION DES DATES D'EXIGIBILITÉ..... | 37 |
| 3.1 Revue de la littérature | 37 |
| 3.1.1 Méthodes analytiques..... | 37 |

| | | |
|---|---|----|
| 3.1.2 | Méthodes empiriques | 40 |
| 3.1.3 | Méta-heuristiques | 41 |
| 3.1.4 | Sommaire | 42 |
| 3.2 | Application des heuristiques usuelles | 43 |
| 3.2.1 | Méthode constante | 44 |
| 3.2.2 | Méthodes utilisant les données des commandes | 44 |
| 3.2.2.1 | Méthodes SLK et MSLK | 44 |
| 3.2.2.2 | Méthodes TWK et MTWK | 45 |
| 3.2.3 | Méthodes utilisant les données du système de production | 46 |
| 3.2.4 | Autres méthodes usuelles | 47 |
| 3.3 | Nouvelles heuristiques | 48 |
| 3.3.1 | Critique des méthodes usuelles | 48 |
| 3.3.2 | Méthodes TIS et MTIS | 48 |
| 3.3.3 | Nouvelles méthodes tenant compte de la variation de l'état du système | 49 |
| 3.3.3.1 | Méthode TUD | 49 |
| 3.3.3.2 | Méthode PUD | 50 |
| 3.3.3.3 | Méthode TUQ | 51 |
| 3.3.3.4 | Méthode PUQ | 51 |
| 3.4 | Détermination des coefficients | 52 |
| CHAPITRE 4 LE PLAN D'EXPÉRIENCE | | 54 |
| 4.1 | Généralités | 54 |
| 4.2 | Description du système de réfection | 54 |
| 4.3 | Construction du plan d'expérience | 57 |
| 4.4 | Modélisation | 62 |
| 4.4.1 | Régime transitoire | 62 |
| 4.4.2 | Nombres sources | 62 |
| 4.4.3 | Traitement des données | 63 |
| 4.5 | Étude préliminaire : justification des paramètres indépendants | 64 |
| 4.5.1 | Méthodologie de justification | 65 |
| 4.5.2 | Distribution normale des échantillons | 67 |
| 4.5.3 | Variances égales, test F de Fisher | 68 |
| 4.5.4 | Test paramétrique, t de Student | 69 |
| 4.5.5 | Interprétation des résultats | 71 |
| 4.6 | Méthodologie d'analyse des résultats de la modélisation | 71 |
| 4.7 | Résultats des tests d'hypothèse | 74 |
| 4.8 | Classement des méthodes d'assignation des dates d'exigibilité | 75 |
| CHAPITRE 5 COMPORTEMENTS DES MÉTHODES | | 76 |
| 5.1 | Commande de type 1 sous le critère de performance MAL | 76 |
| 5.2 | Commande de type 2 sous le critère de performance MAL | 77 |
| 5.3 | Commande de type 1 sous le critère de performance MSL | 77 |
| 5.4 | Commande de type 2 sous le critère de performance MSL | 77 |
| 5.5 | Contextes de temps d'ouverture par jour faible et élevé | 82 |
| 5.5.1 | TOJ faible | 82 |

| | | |
|---|---|-----|
| 5.5.2 | TOJ élevé | 83 |
| 5.6 | Contextes de nombre des serveurs par station faible et élevé..... | 84 |
| 5.6.1 | NSS faible | 84 |
| 5.6.2 | NSS élevé..... | 85 |
| 5.7 | Contextes de variabilité élevé et faible | 86 |
| 5.8 | Récapitulatif..... | 87 |
| 5.8.1 | Classement des méthodes..... | 87 |
| 5.8.2 | Évolution des méthodes | 89 |
| 5.8.3 | Recommandations | 91 |
| CHAPITRE 6 VALIDATION DES MODÈLES ET CAS RÉELS | | 93 |
| 6.1 | Validation des comportements des méthodes | 93 |
| 6.1.1 | Modèles de régression..... | 93 |
| 6.1.2 | Validation des modèles | 95 |
| 6.1.3 | Résultats et modèles..... | 99 |
| 6.1.3.1 | Étude de JIS | 99 |
| 6.1.3.2 | Étude de PUD..... | 100 |
| 6.1.3.3 | Étude de PUQ..... | 102 |
| 6.1.3.4 | Comparatif de PUD et PUQ sous le critère MAL..... | 104 |
| 6.1.4 | Récapitulatif de la validation des modèles..... | 106 |
| 6.2 | Étude d'un cas réel | 107 |
| 6.2.1 | Description du système de réfection | 107 |
| 6.2.2 | Scénarios et critères de performance..... | 110 |
| 6.2.3 | Simulation | 110 |
| 6.2.4 | Résultats | 111 |
| 6.2.5 | Autres méthodes de planification..... | 114 |
| CONCLUSION | | 117 |
| ANNEXE 1 Réseau du modèle de simulation pour la cinquième réplification | | 121 |
| ANNEXE 2 Fichier de contrôle du Modèle de simulation | | 126 |
| ANNEXE 3 Macro VBA Excel optimisant les performances des méthodes de DDA .. | | 128 |
| ANNEXE 4 Tests statistiques | | 142 |
| ANNEXE 5 Tests de significativité | | 152 |
| ANNEXE 6 Résultats des modèles pour JIS sous le critère MAL | | 155 |
| ANNEXE 7 Résultats des modèles pour JIS sous le critère MSL | | 157 |
| ANNEXE 8 Résultats des modèles pour PUD sous le critère MAL | | 159 |
| ANNEXE 9 Résultats des modèles pour PUD sous le critère MSL | | 161 |
| ANNEXE 10 Résultats des modèles pour PUQ sous le critère MAL | | 163 |
| ANNEXE 11 Résultats des modèles pour PUQ sous le critère MSL | | 165 |

| | |
|---|-----|
| ANNEXE 12 Réseau du système de réfection réel dans sa situation actuelle..... | 167 |
| ANNEXE 13 Contrôle du système de réfection réel dans sa situation actuelle..... | 170 |
| RÉFÉRENCES | 172 |

LISTE DES TABLEAUX

| | | Page |
|---------------|---|------|
| Tableau I | Caractéristiques des opérations de MRO | 10 |
| Tableau II | Nomenclature de la lampe de poche | 30 |
| Tableau III | Description détaillée des activités..... | 35 |
| Tableau IV | Description des facteurs indépendants du plan d'expérience | 58 |
| Tableau V | Cinquième fichier INPUT pour le modèle de simulation: « DOE5.txt » | 60 |
| Tableau VI | Groupes à comparer sur leurs taux de congestion..... | 64 |
| Tableau VII | Test des valeurs d'asymétrie et d'aplatissement sur les taux d'utilisation des stations..... | 67 |
| Tableau VIII | Test d'homoscédasticité sur les taux d'utilisation des stations..... | 69 |
| Tableau IX | Résultats des tests <i>t</i> sur les taux d'utilisation des stations | 70 |
| Tableau X | Résultats du test de la normalité des populations des échantillons.... | 74 |
| Tableau XI | Classement des méthodes de DDA pour les commandes de type 1 sous l'objectif MAL | 78 |
| Tableau XII | Classement des méthodes de DDA pour les commandes de type 2 sous l'objectif MAL | 79 |
| Tableau XIII | Classement des méthodes de DDA pour les commandes de type 1 sous l'objectif MSL..... | 80 |
| Tableau XIV | Classement des méthodes de DDA pour les commandes de type 2 sous l'objectif MSL..... | 81 |
| Tableau XV | Contextes d'application des méthodes de DDA | 90 |
| Tableau XVI | Comparaison des performances des méthodes de DDA selon le contexte d'application | 91 |
| Tableau XVII | Signe des paramètres influents des modèles de JIS | 99 |
| Tableau XVIII | Signe des paramètres influents des modèles de PUD | 102 |
| Tableau XIX | Signe des paramètres influents des modèles de PUQ | 104 |
| Tableau XX | Description des activités du système de réfection réel..... | 108 |
| Tableau XXI | Description des stations de travail..... | 109 |
| Tableau XXII | Taux d'utilisation (%) pour les trois scénarios | 113 |

LISTE DES FIGURES

| | | Page |
|-----------|--|------|
| Figure 1 | Interactions entre les activités du cycle de vie d'un produit..... | 4 |
| Figure 2 | Lampe de poche | 18 |
| Figure 3 | Graphe des composants et des attaches de la lampe de poche..... | 19 |
| Figure 4 | Matrice de connectivité, E, et matrice des attaches, F, | 19 |
| Figure 5 | Graphe orienté de la lampe de poche | 20 |
| Figure 6 | Graphe ET/OU de la lampe de poche | 21 |
| Figure 7 | Réseau de Pétri de la lampe de poche | 22 |
| Figure 8 | Étapes principales d'un processus de désassemblage/assemblage | 24 |
| Figure 9 | Représentation symétrique d'un processus de désassemblage/assemblage | 25 |
| Figure 10 | Nomenclature explosée de la lampe de poche | 30 |
| Figure 11 | Sens de lecture pour les processus de désassemblage et d'assemblage | 31 |
| Figure 12 | Symbole de l'inspection d'un composant | 32 |
| Figure 13 | Processus de désassemblage/assemblage avec les nœuds de décisions | 33 |
| Figure 14 | A) Désassemblage du produit A, B) Réassemblage du produit A, C) Désassemblage du composant B, D) Réassemblage du composant B, E) Désassemblage du composant D, F) Réassemblage du composant D et G) Réseau d'activités | 34 |
| Figure 15 | Méthodologie déployée pour comparer les méthodes de DDA dans le système de réfection..... | 59 |
| Figure 16 | Étapes du calcul des performances des méthodes de DDA | 63 |
| Figure 17 | Démarche pour déterminer le test de comparaison adéquat..... | 66 |
| Figure 18 | Démarche de comparaison statistique des performances des méthodes d'assignation des dates d'exigibilité | 72 |
| Figure 19 | Évolution de la performance des méthodes d'assignation des dates d'exigibilité en fonction du temps d'ouverture par jour | 84 |
| Figure 20 | Évolution de la performance des méthodes d'assignation de dates d'exigibilité en fonction du nombre de serveurs par station de travail | 86 |

| | | |
|-----------|---|-----|
| Figure 21 | Évolution de la performance des méthodes d'assignation des dates d'exigibilité en fonction de la variabilité des temps d'opération..... | 87 |
| Figure 22 | Procédure de validation et d'optimisation des modèles de régression avec les variables explicatives CAP et VAR | 97 |
| Figure 23 | Procédure de validation et d'optimisation des modèles de régression utilisant les variables NSS, TOJ et VAR | 98 |
| Figure 24 | Domaine d'application de PUD et de PUQ sous le critère MAL | 106 |
| Figure 25 | Schéma du processus réel de réfection | 107 |
| Figure 26 | Performances MAL de SLK dans le système de réfection réel | 111 |
| Figure 27 | Nombre de commandes refusées dans le système de réfection réel. | 112 |
| Figure 28 | Retard moyen absolu (h) des méthodes de planification dans la situation actuelle du système de réfection (selon le scénario SC1) . | 115 |
| Figure 29 | Retard moyen absolu (h) des méthodes de planification dans la solution 1 (scénario SOL1) | 115 |
| Figure 30 | Retard moyen absolu (h) des méthodes de planification dans la solution 2 (scénario SOL2) | 116 |

LISTE DES ABRÉVIATIONS ET SIGLES

| | |
|--------------|---|
| α | Niveau de confiance (%) |
| ANOVA | Analyse de la variance (<i>Analysis of variance</i>) |
| AON | Réseaux d'activités avec celles-ci placées sur les nœuds |
| ASF | Assemblage final |
| ATP | Date d'exigibilité fixée selon la disponibilité (<i>Available to promise</i>) |
| BOM | Nomenclature (<i>Bill of material</i>) |
| BOMfr | Feuille de route ou diagramme des processus |
| C | Statistique de Cochran |
| c_j | Date de sortie de la $j^{\text{ème}}$ commande |
| CMA | Carré moyen entre les groupes |
| CM_{RES} | Carré moyen à l'intérieur des groupes |
| CON | Méthode « CONSTANTE » |
| CST | Terme constant des modèles de régression |
| DDA | Assignation des dates d'exigibilité (<i>Due date assignment</i>) |
| Δt | Temps interarrivée entre les commandes |
| DES | Désassemblage |
| DFE | Conception écologique (<i>Design for environment</i>) |
| df_{error} | Degré de liberté associé à la somme des carrés des erreurs (SCE) |
| df_{total} | Degré de liberté associé à la somme totale des carrés (SCT) |
| d_j | Date d'exigibilité la $j^{\text{ème}}$ commande |
| EBOM | Nomenclature explosée |
| ECMPR | Développement et de récupération écologique des produits (<i>Environmentally Conscious Manufacturing and Product Recovery</i>) |
| EMB | Emballage |
| ENV | Envoi |
| EXPON(.) | Distribution de probabilité selon la loi exponentielle |

| | |
|----------------------|--|
| F | Statistique de Fisher |
| F_{\max} | Statistique de Hartley |
| F_p | Statistique F partiel suivant une distribution de Fisher |
| FIFO | Règle du premier arrivé premier servi (<i>First in first out</i>) |
| h | Heure: unité de temps |
| H | Statistique du test de Kruskal-Wallis |
| HSD | Test de Tukey (<i>Honestly significant difference</i>) |
| \inf_i | Limite inférieure de l'encoche de la boîte à moustaches du groupe i |
| j | Indice de la $j^{\text{ème}}$ commande |
| j_last | Indice de la dernière commande sortie du système à l'arrivée de la $j^{\text{ème}}$ commande |
| JIQ | Méthode du nombre de tâches dans les files d'attente (<i>Jobs in queue</i>) |
| JIQ_s | Nombre de tâches attendant dans la file d'attente devant la station s |
| JIS | Méthode du nombre de tâches dans le système (<i>Jobs in system</i>) |
| JIS_s | Nombre de tâches attendant devant et cours d'exécution dans la station s |
| k | Nombre de groupes |
| k_1, \dots, k_{17} | Paramètre à optimiser des méthodes d'assignation des dates d'exigibilité |
| k_x | Nombre de facteurs explicatifs dans le modèle de régression |
| LCA | Analyse du cycle de vie (<i>Life cycle analysis</i>) |
| LRCA | Laboratoire de recherche sur les chaînes d'approvisionnement |
| m | Indice des serveurs aux stations de travail |
| MAL | Retard moyen absolu (<i>Mean absolute lateness</i>) |
| MAL_{PUD} | Performance de la méthode PUD sous le critère MAL selon le modèle de régression |
| MAL_{PUQ} | Performance de la méthode PUQ sous le critère MSL selon le modèle de régression |
| MAL-1 | Ensemble des scénarios ayant pour critère MAL et considérant le premier type de commande |

| | |
|-----------|---|
| MAL-2 | Ensemble des scénarios ayant pour critère MAL et considérant le deuxième type de commande |
| MRO | Maintenance, révision et réfection (<i>Maintenance, repair and overhaul</i>) |
| MRP | Plan des besoins matières (<i>Material requirements planning</i>) |
| MRR | Taux de recouvrement matière (<i>Material recovery rate</i>) |
| MSL | Retard moyen quadratique (<i>Mean square lateness</i>) |
| MSL-1 | Ensemble des scénarios ayant pour critère MSL et considérant le premier type de commande |
| MSL-2 | Ensemble des scénarios ayant pour critère MSL et considérant le deuxième type de commande |
| MSLK | Méthode du tampon moyen (<i>Mean Slack</i>) |
| MTIS | Méthode du temps de passage moyen (<i>Mean Time In System</i>) |
| MTWK | Méthode de la charge de travail moyenne (<i>Mean Total Work Content</i>) |
| μ | Moyenne des temps d'opération (h) |
| ν | Degré de liberté correspondant à CM_{RES} |
| n | Nombre de commandes |
| n_i | Taille du $i^{\text{ème}}$ groupe |
| N | Nombre total de données |
| N_j | Nombre d'opérations effectuées sur la commande j |
| NET | Nettoyage |
| NOP | Méthode du nombre d'opérations |
| NORM(...) | Distribution selon la loi normale |
| NSS | Nombre de serveurs en parallèle par station de travail |
| OACI | Organisation de l'aviation civile internationale |
| PD/A | Processus de désassemblage/assemblage |
| PERT | Planification des tâches d'un projet (<i>Program Evaluation and Review Technics</i>) |
| PIN | Première inspection |
| $p_{i,j}$ | Durée de la $i^{\text{ème}}$ opération de la $j^{\text{ème}}$ commande |

| | |
|----------------|--|
| p_j | Temps de passage de la $j^{\text{ème}}$ commande dans le système de réfection |
| PPW | Méthode du temps de passage plus l'attente (<i>Processing-Plus-Wait</i>) |
| PUD | Méthode de la charge de travail plus un terme correctif selon la différence des taux d'utilisation des stations de travail (<i>Total work content Plus Utilization rates Difference</i>) |
| PUQ | Méthode de la charge de travail plus un terme correctif selon le quotient des taux d'utilisation des stations de travail (<i>Total work content Plus Utilization rates Quotient</i>) |
| q | Tampon dans la formule de la méthode PPW |
| $Q25_i$ | 25 ^{ème} percentile du groupe i |
| $Q75_i$ | 75 ^{ème} percentile du groupe i |
| REP | Réparation |
| r_j | Date de réception de la $j^{\text{ème}}$ commande |
| \bar{R}_i | Rang moyen du $i^{\text{ème}}$ groupe |
| R_{ij} | Rang de la $j^{\text{ème}}$ donnée du $i^{\text{ème}}$ groupe |
| S | Nombre de stations de travail |
| SAS | Sous-assemblage |
| S_i^2 | Variance du $i^{\text{ème}}$ groupe |
| S_p^2 | Variance agrégée |
| SCE | Somme des erreurs au carré |
| SCT | Somme totale des carrés |
| SCR | Somme des carrés expliquée par le modèle de régression |
| $SCR(x_k, X)$ | Apport du facteur explicatif x_k par rapport au modèle de régression X |
| SIN | Seconde inspection |
| SLK | Méthode du tampon (<i>Slack</i>) |
| sup_i | Limite supérieure de l'encoche de la boîte à moustache du groupe i |
| TES | Test final |

| | |
|-------------------|---|
| TIS | Méthode du temps de passage (<i>Time in system</i>) |
| TND | Test non destructif |
| TOJ | Temps d'ouverture par jour (h) |
| $tps_simulation$ | Temps de simulation (h) |
| tps_trav_m | Durée passée à traiter les commandes par le serveur m (h) |
| TUD | Méthode de la charge de travail multipliée par un terme correctif selon la différence des taux d'utilisation des stations de travail (<i>Total work content Times Utilization rates Difference</i>) |
| TUQ | Méthode de la charge de travail multipliée par un terme correctif selon la différence des taux d'utilisation des stations de travail (<i>Total work content Times Utilization rates Quotient</i>) |
| TU_s | Taux d'utilisation de la station s |
| $TU_{s,j}$ | Taux d'utilisation de la station s à la réception de la commande j |
| TX_s | Taux comparable de la station s |
| TWK | Méthode de la charge de travail (<i>Total work of content</i>) |
| TWKCP | Méthode de la charge de travail sur le chemin critique (Total work content on Critical Path) |
| UD_i | Terme correctif selon la différence des taux d'utilisation des stations de travail à l'arrivée de la $j^{ème}$ commande (<i>Utilization rate Difference</i>) |
| UQ_i | Terme correctif selon le quotient des taux d'utilisation des stations de travail à l'arrivée de la $j^{ème}$ commande (<i>Utilization rate Quotient</i>) |
| VAR | Variabilité des temps d'opération (%) |
| VIF | Facteur d'inflation de la variance (<i>Variance inflation factor</i>) |
| w_{ij} | Écart critique ou écart minimum de séparation entre les groupes i et j |
| \bar{y} | Moyenne de toutes les données |
| y_{ij} | Valeur de la $j^{ème}$ donnée du $i^{ème}$ groupe |
| \bar{y}_i | Moyenne des données du $i^{ème}$ groupe |

| | |
|---------------|---|
| \bar{y}_i^t | Moyenne tronquée à 10 % des données du $i^{\text{ème}}$ groupe |
| \tilde{y}_i | Médiane des données du $i^{\text{ème}}$ groupe |
| \hat{y}_i | Estimation de la donnée y_i selon le modèle de régression considéré |

INTRODUCTION

Un processus de désassemblage/assemblage (noté PD/A) est une séquence d'opérations qui débute par un désassemblage et qui se termine par un réassemblage; qui aboutit à un produit équivalent au produit original. En d'autres termes, certaines pièces ont pu être modifiées, conservées, enlevées ou ajoutées au cours du processus sans modifier la nature et la fonction du produit original. Le PD/A se retrouve dans plusieurs contextes. Par exemple, la réfection est une opération qui vise à remettre à neuf un produit. Une activité de réfection comprend bien d'autres étapes outre le désassemblage et le réassemblage : vérifications, nettoyage, ajustements, diagnostics, remplacements, réparations, ... Lors d'une révision, il s'agit d'une maintenance réalisée de façon préventive ou corrective visant à restaurer un élément conformément à l'état spécifié. Ainsi, le PD/A prend une place de plus en plus importante dans l'industrie.

Au cœur des processus de réfection, se situent l'étape de désassemblage/ assemblage. La découverte graduelle des défauts implique de nombreuses incertitudes. La prévision et la planification se heurtent à la grande variabilité du système. Au centre de ce problème se situe la prévision de la date d'exigibilité. La date d'exigibilité est la date à laquelle le travail de réfection est complété. La date d'exigibilité est essentielle à la planification de la production. De nombreuses règles de priorité se basent sur la date d'exigibilité du produit. De plus, la date d'exigibilité est le socle de la négociation d'une date de livraison des produits avec les clients.

Ce mémoire a donc plusieurs objectifs :

- a. Identifier les sources et la nature des incertitudes dans un système PD/A;
- b. Comparer plusieurs règles de détermination de la date d'exigibilité afin de comprendre leurs comportements et d'en déterminer les meilleures selon les paramètres du système.

Le Chapitre 1 est composé de deux parties. Dans une première partie, on définit le contexte et les caractéristiques générales d'un processus de réfection. Il existe de grandes différences par rapport à un processus de production usuel. La suite de ce chapitre traite des incertitudes du processus dans son ensemble. Le deuxième chapitre détaille la modélisation du PD/A. Dans un premier temps, on met en évidence l'interaction entre les inspections, les prises de décision et les routages. Une nouvelle représentation du diagramme des processus est introduite. Cette représentation met en évidence le besoin d'une meilleure compréhension du processus. Le chapitre 3 rapporte la revue de la littérature des méthodes de planification. Les méthodologies des études précédentes ainsi que leurs objectifs seront présentés. Différentes techniques d'assignation des dates d'exigibilité seront exposées. Les avantages et inconvénients de chacune seront détaillés. Dans la seconde partie du chapitre 3, chaque heuristique est discutée et appliquée au cas présent. A partir des observations des heuristiques usuelles, de nouvelles heuristiques sont proposées afin de répondre aux caractéristiques du problème. Le chapitre 4 décrit l'expérimentation. Tout d'abord, le modèle simulé du système de réfection est introduit. Puis, les paramètres influents sont identifiés selon lesquels la table ANOVA (*Analysis of Variance*) est construite. Enfin, différents tests statistiques sont mis en œuvre et comparés. Le chapitre 5 souligne le comportement des méthodes comparées. Différentes tendances sont observées. Finalement, le chapitre 6 valide les observations précédentes en étudiant quantitativement le comportement de méthodes d'assignation de dates d'exigibilité. La seconde partie de ce chapitre décrit l'étude d'un cas réel. La conclusion permettra de mettre en valeur l'apport de ce mémoire aux connaissances actuelles mais aussi les interrogations posées pour les travaux futurs.

CHAPITRE 1

CONTEXTE ET PROBLÉMATIQUE

1.1 Contexte général

La dernière décennie est marquée par le souci de l'environnement. Les générations actuelles marquent un attachement profond à la sauvegarde d'un patrimoine culturel et écologique afin de léguer aux générations futures un monde intact voire meilleur. De ce fait, la société de consommation a pris conscience que la consommation de ressources généralement non renouvelables entraîne l'épuisement de ces dernières.

Les industries ont donc adopté de nouvelles stratégies. Gungor et Gupta (1999) donnent l'état des développements en matière de développement et de récupération écologique des produits (ECMPR, *Environmentally Conscious Manufacturing and Product Recovery*). Les entreprises ont développé des écobilans ou analyses du cycle de vie (LCA, *Life Cycle Analysis*). Ceux-ci sont des études visant à évaluer les impacts globaux sur l'environnement d'un procédé ou d'une chaîne d'activités. Par conséquent, le LCA couvre toutes les étapes de la vie du produit, de sa conception à son utilisation, puis à son retrait du marché en passant par sa production. Le LCA met en place la conception écologique, un outil permettant de limiter l'impact sur l'environnement en améliorant la conception du produit. Cela induit donc une réduction de la consommation de ressources, en termes de matières et d'énergies, et une prévention des pollutions. La Figure 1 décrit le cycle de vie d'un produit et les actions de LCA et de la conception écologique. Le cycle de vie du produit est décomposé en quatre (4) étapes majeures : conception, fabrication, utilisation et récupération. Toutes ces étapes sont interdépendantes. La conception du produit tient compte lors de la conception écologique, DFE (*design for environment*), des autres étapes du cycle de vie du produit.

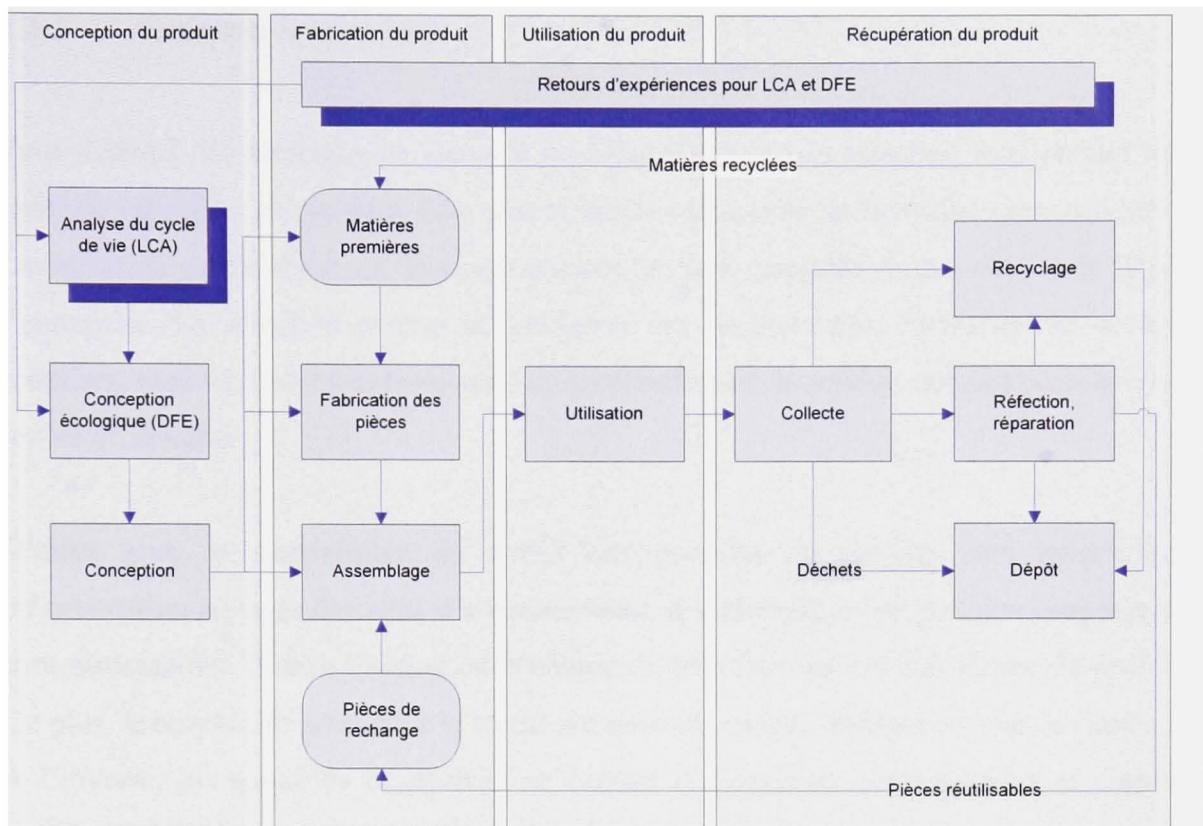


Figure 1 Interactions entre les activités du cycle de vie d'un produit
(Adapté de Gungor et Gupta (1999))

Une des activités possibles lors de la phase de récupération est la réfection (MRO, *Maintenance, Repair and Overhaul*). Suite aux activités de MRO, les pièces réutilisables sont retournées au centre de fabrication. Les pièces recyclables fourniront la matière première de nouvelles pièces. Les autres pièces sont mises au dépôt. Les activités de MRO se développent pour différentes raisons qui seront détaillées dans les trois prochaines sections (sections 1.2, 1.3 et 1.4).

1.2 Contexte économique

Tout d'abord, les stratégies de l'entreprise découvrent que la réfection leur permet de créer de nouvelles offres dans leur service après-vente avec un investissement modéré. La réfection ouvre donc un nouveau marché et une nouvelle source de profit pour l'entreprise. La réfection permet de récupérer des produits plus facilement et de les réutiliser, mais les pièces défectueuses et éventuellement le produit doivent parfois être retirés du marché.

D'autre part, le responsable du retrait des produits du marché aura moins de préoccupation au sujet des sites d'enfouissement, d'incinération des produits usagés qui sont dispendieux. Il aura l'option de la chaîne de réfection qui est une source de profit. De plus, le nombre de sites pour le retrait des produits usagés diminue d'année en année. A l'inverse, les quantités de déchets ne cessent d'augmenter selon Gungor et Gupta (1999). Politiciens et gouvernements décrivent la réfection comme une opportunité d'emploi pour les communautés environnantes (voir Steinhilper et Hieber, 2001).

Le consommateur peut maintenant acquérir un produit révisé ou remis à neuf à un prix 40 à 80 % moins cher que le produit neuf (voir Steinhilper et Hieber, 2001). La remise à neuf¹ est l'occasion pour le client d'obtenir des nouveaux produits de la haute-technologie. Puisque la révision des produits dispendieux est moins onéreuse que leur remplacement par des produits neufs (Klimisch, 1994, Gharbi *et al.*, 1996 et Steinhilper et Hieber, 2001), de nombreuses entreprises proposent des extensions de garanties.

La réfection procure au produit un état neuf ou quasi-neuf et ceci est possible à plusieurs reprises au cours de la vie du produit. La réfection symbolise pour les analystes une

¹ La réfection est une opération de remise à neuf du produit tandis que, la révision est une opération de maintenance qui remet le produit en bon état de marche.

prise de risque pour la conception de produits à plusieurs cycles de vie au lieu de produits à un seul cycle de vie. Ceci permet donc de diminuer les risques liés à l'introduction d'un nouveau produit et d'assurer une meilleure rentabilité. La réfection ouvre l'avenir d'un produit qui ne vieillit pas ou tout du moins très lentement, puisque la durée de la période d'utilisation du produit est rallongée de façon considérable.

Le marché économique des entreprises de réfection aéronautique est directement lié à la demande de voyage par avion. Plus l'usage des avions augmente, plus la demande de révision est importante. Ainsi, le marché de la réfection aéronautique est très incertain. Depuis les événements de septembre 2001, les entreprises de réfection américaines enregistrent une baisse importante de leur marché et donc de leur chiffre d'affaires. On cherche souvent à minimiser les coûts de maintenance, car ces activités sont vues comme des temps de non-productivité, mais aussi comme nécessaires au respect des normes de sécurité des avions. Par exemple, la section V de la partie VII « Services aériens commerciaux » du règlement de l'aviation canadienne définit les « exigences relatives à l'équipement des aéronefs ». Cependant, il ne faut pas oublier la valeur ajoutée de ces activités. La révision améliore nettement les performances du produit. En restaurant les caractéristiques d'origine du produit, on réduit le temps d'immobilisation des futures opérations de MRO, la probabilité de défectuosité et la probabilité d'accident.

En aéronautique, les coûts de remplacement d'une flotte d'avions sont importants. Par conséquent, le budget alloué à la maintenance des avions est privilégié. Une opération de remise à neuf coûte 40 % à 70 % moins chère qu'une acquisition de matériel neuf (voir Gharbi *et al.*, 1996). Ceci évite aussi les coûts d'entraînement de l'équipage lors de l'achat de nouveaux matériels (Gharbi *et al.*, 1996).

1.3 Contexte de qualité

La réfection est l'action de réparer et de restaurer selon le dictionnaire français (voir Dendien *et al.*, 2004). Le premier article définissant le plus exactement la réfection a été publié en 1983 par Lund (1983).

« [La réfection est] un processus industriel dans lequel des pièces usagées sont restaurées dans des conditions quasi-neuves. À travers une série de procédés industriels, le produit dont le consommateur a retourné est désassemblé. Les pièces réutilisables sont nettoyées, remises à neuf, et mises en inventaire. Ensuite, le nouveau produit est réassemblé à partir de l'ancien et si nécessaire de pièces neuves afin de produire une unité dont les performances et la durée de vie sont entièrement équivalentes et parfois supérieures à celles du produit neuf original. » (Traduit de Guide, 2000)

La réfection est donc à distinguer d'une simple réparation, car elle peut rallonger la durée de vie utile et améliorer les performances du produit. La révision des produits améliore la fiabilité et la sécurité des produits en restaurant leurs performances d'origine. Ceci est très important dans le domaine de l'aéronautique. L'Organisation de l'aviation civile internationale (OACI), dont le siège se trouve à Montréal, élabore des normes et pratiques recommandées à l'égard des pays membres de l'organisation. Ainsi, par les différentes réglementations, les compagnies aériennes se doivent d'assurer la sécurité, la régularité et l'efficacité de leurs vols.

La seconde caractéristique importante est de permettre aux compagnies aériennes de disposer d'avions à tout moment. Il est important que les vols soient à l'heure. Il faut assurer que les avions soient disponibles. Ceci est primordial pour le domaine de la défense. Les armées souhaitent pouvoir disposer de leur matériel à tout moment.

Finalement, l'implantation d'un système de réfection engendrera de nouvelles problématiques pour les ingénieurs et les ouvriers qui pourront ainsi développer leurs qualités et leurs compétences. La section 1.6 présente tous les obstacles et les difficultés

rencontrées lors de la gestion d'un système de réparation. Ce dernier présente plus d'incertitudes qu'un système de production usuel. Les gestionnaires et les employés auront à développer des expertises pour surmonter ces obstacles. En outre, l'analyse du cycle de vie qui assure la conception du système de réparation met les décideurs de l'entreprise face à de réelles problématiques. Dans le cadre d'une automobile, l'emploi de plastiques au lieu d'aciers réduit le poids de la voiture et par conséquent sa consommation et la pollution engendrée. Par contre, les plastiques impliquent des modes de tri et de recyclage difficiles à l'inverse de l'acier (voir Klimisch, 1994).

1.4 Contexte environnemental

La société actuelle est soucieuse de l'avenir des générations futures. Nous souhaitons léguer à nos enfants un environnement sain et profitable. Ainsi est apparu le terme de développement durable. C'est dans ce contexte que les entreprises de réparation ont pu prendre leur essor. On cherche à protéger l'environnement en recyclant ou en réparant les produits déjà existants.

À travers le monde, les législations favorisent les entreprises qui respectent l'environnement (Guide *et al.* (1997a), Guide (2000) et Steinhilper et Hieber, 2001). Les entreprises de réparation génèrent moins de déchets et consomment moins d'énergie et de matières premières. Il est important d'éviter les gaspillages pour préserver les ressources naturelles. Dans le cadre de sa politique de développement durable, le gouvernement du Québec a créé en 1990 une société nommée Recyc-Québec. Cette entreprise se préoccupe de la gestion des matières résiduelles.

1.5 Trois grandes familles d'activités

Les processus de maintenance, de réparation et de réfection (MRO, *Maintenance, Repair and Overhaul*) peuvent se distinguer en trois (3) grandes familles d'opérations (voir Guide Jr. *et al.*, 2000) :

- a. La réparation.
- b. La remise à neuf.
- c. Le recyclage.

Le Tableau I récapitule les caractéristiques de chaque famille de procédé. La colonne « Identité du produit » relève s'il y a ou non identification des unités traitées. Le degré de désassemblage précise le niveau d'intérêt des opérations effectuées. Les deux (2) dernières colonnes précisent si les unités sortant de l'usine et le travail sont des produits à valeur ajoutée.

Le recyclage se distingue nettement des deux (2) autres types d'opérations. Il vise à produire de la matière première à partir des produits usagés. À l'inverse, les deux (2) autres procédés remettent en circulation la pièce après l'avoir réparée et/ou révisée. De plus, quel que soit l'état de la pièce, le processus de recyclage sera toujours le même. Ceci n'est pas vrai pour les opérations de réfection. Selon l'état du produit, un processus spécifique est établi pour restaurer les propriétés du produit. Les séquences d'opérations, le type et la durée des opérations sont à définir à chaque produit reçu. Dans les chapitres suivants, le recyclage ne sera pas pris en considération sauf mention contraire. Ainsi par la suite, le terme MRO regroupe la réparation et la remise à neuf.

Tableau I

Caractéristiques des opérations de MRO
(Traduit de Guide Jr. *et al.*, 2000)

| Opération | Caractéristiques | | | | |
|---------------|---------------------------|------------------------|-----------------------------|---|--------------------------|
| | Identité du produit | Degré de désassemblage | Étendue des transformations | Matériel à valeur ajoutée | Travail à valeur ajoutée |
| Réparation | Unité | Diagnostic | Aucune | Remplacement ou réparation des pièces défectueuses | Limité |
| Remise à neuf | Unité, composant ou pièce | Complet | Limité | Remplacement des pièces non réparables et mises à jour techniques | Extensif |
| Recyclage | Aucun | Matériel | Complet | Aucun ajout | Limité |

La section 1.6 vise à détailler les différents phénomènes particuliers aux systèmes de MRO.

1.6 Incertitudes d'un système de MRO

Cette partie vise à inventorier les différents aspects inconnus ou hautement incertains dans un processus de MRO. Par conséquent, chaque aspect qui est inconnu ou variable est examiné successivement. Leurs impacts et leurs influences sur la gestion du processus sont également détaillés dans cette section.

1.6.1 Incertitude de temps et de quantité de retour

Les retours désignent les produits usagés retournés au centre de réfection. L'incertitude sur le temps et la quantité de retours naît du caractère incertain du cycle de vie d'un produit. En effet, il est difficile de savoir quand les demandes vont arriver et en quelles

quantités. De ce fait, il est difficile de faire des prédictions sur l'approvisionnement de pièces de rechange, ou de stock tampon. De plus, les entreprises ont peu de contrôle sur l'arrivée des pièces à réviser (Guide, 2000). Cela entraîne des surcharges ponctuelles.

La demande est très variable. Il existe plusieurs causes de retour des pièces :

- a. Révision périodique : C'est le cas d'une maintenance planifiée. La vidange est une opération cyclique qui est un bon exemple.
- b. Chute de performance : On constate un fonctionnement anormal du produit. Si le freinage d'une voiture devient peu efficace, celle-ci est apportée au garagiste.
- c. Bris du produit : C'est le cas d'un accident lors de la rupture d'une pièce. Si une courroie casse, il faut alors la remplacer.

Ainsi, on peut distinguer les révisions planifiées des commandes urgentes (Keizers *et al.*, 2001). Les commandes urgentes regroupent les commandes dues à une chute de performance ou au bris d'un composant. Ces commandes sont les sources d'incertitude qui rendent la demande peu prévisible.

1.6.2 Besoin d'équilibre entre les retours et la demande

Les systèmes de réparation peuvent être amenés à répondre à une certaine demande comme tout système de production. Cependant, le taux de production d'un système de réparation dépend de la quantité de produits retournés. Ainsi, un équilibre est nécessaire entre les retours et la demande.

L'équilibre entre les retours et la demande est fonction du cycle de vie du produit et du taux d'innovations technologiques². Le but est de faire des profits en équilibrant les produits retournés par les consommateurs et la demande de produits révisés. Ceci génère des stocks supplémentaires lorsque la demande est inférieure à la quantité de retours ou des ruptures de stocks lorsque la demande est supérieure à la quantité de retours.

Si la quantité de retours est faible la quantité de pièces de rechange extraites des retours est faible. Lorsque les pièces de rechange ne sont pas disponibles, les pièces retournées sont utilisées comme remplacements. Le problème du contrôle des stocks se complexifie (Guide, 2000). Cette caractéristique influence la conception des outils de planification et de contrôle de la production puisque les pièces varient énormément dans le temps (Guide *et al.* (1999).

1.6.3 Désassemblage des produits retournés

Le désassemblage est une des premières opérations et constitue la porte d'entrée du processus de réfection. En effet, c'est à partir du désassemblage que les différentes pièces sont mises à disposition pour les opérations futures. Une des problématiques à résoudre est le choix de la politique de mise à disposition des pièces afin de minimiser le temps dans le système. Cette politique doit viser à la coordination des activités de désassemblage, de révision et de réassemblage afin d'éviter des surcharges de travail.

Le désassemblage n'est pas l'opération inverse de l'assemblage car une conception bonne pour l'assemblage ne l'est pas forcément aussi pour le désassemblage. En effet, lors de la conception des produits, l'attention est portée sur l'assemblage et la fabrication des produits. Les produits non-conçus pour le désassemblage ont des taux de

² Plus l'innovation est importante dans un secteur, plus les produits évoluent vite. Dans ce contexte l'équilibre entre les produits actuels et les produits retournés est complexe car la différence entre ceux-ci est importante.

recouvrement des matériaux (MRR, *Material Recovery Rate*) moins prévisibles, des temps de démontage plus importants et produisent plus de déchets. En effet, lors du démontage, de nombreuses pièces peuvent être détériorées si le produit n'a pas été conçu pour pouvoir être démonté. Ainsi, la décision du besoin en pièces de rechange peut être prise dès la fin du désassemblage. Plusieurs études se sont attachées à incorporer la notion de démontage lors de la conception d'un produit (Guide, 2000).

Le temps de désassemblage est hautement variable même pour un même type de produit. Peu d'entreprises ont accès aux spécifications des constructeurs du produit à réviser.

Le démontage est une opération qui requiert de nombreuses ressources et qui est peu automatisée. Une étude a mis en évidence que le désassemblage automatisé ne sera viable que si les produits sont identiques et en grand nombre (série standard). Le désassemblage est donc une opération dispendieuse (Guide *et al.*, 1999).

1.6.4 Incertitude sur les matériaux des produits retournés

Le MRR définit la fréquence à laquelle une pièce est utilisable pour la révision. Toutes les pièces qui ne sont pas récupérables doivent être remplacées par des pièces de rechange. Deux (2) produits identiques peuvent avoir des MRR différents. Un même produit peut contenir des pièces avec un MRR prévisible et d'autres dont la possibilité de réutilisation est inconnue.

Les achats des pièces de rechange doivent se faire en cohérence avec la date de livraison de la commande. Ainsi, la gestion et le contrôle des stocks sont très complexes en raison du caractère stochastique des stocks des pièces réutilisables. Cependant, peu d'entreprises utilisent le MRR lors du calcul des besoins en matériaux et en ressources.

De plus, dans le cas des entreprises de révision par lots, la variabilité du MRR peut retarder la mise à disposition d'un lot de pièces issues du désassemblage. Ainsi, le cas

des entreprises de réparation traitant la demande par lots est un problème des plus complexes (Guide, 2000).

L'état des composants dépend des paramètres d'utilisation du produit, ceux-ci sont pour la plupart stochastiques ou imprévisibles. L'état exact des composants est inconnu lorsque le produit arrive dans l'entreprise. L'état du produit reste inconnu jusqu'à la première inspection (Guide *et al.*, 1997b).

1.6.5 Besoin d'un réseau logistique inverse

Le réseau logistique inverse consiste à la récupération du produit chez le consommateur et le transport du produit jusqu'à l'usine où il sera révisé. Ce besoin est complexe en lui-même. La conception du réseau définit l'emplacement des centres de récupération, l'incitation au recyclage, les moyens de transports, *etc.*

Les activités d'acquisition des produits sont cruciales pour l'acquisition de pièces de rechange dont l'importance a été discutée plus tôt. Lorsque le produit a une forte valeur, le consommateur ramène directement le produit à l'entreprise. Ceci est à différencier des biens de recyclage qui sont sujets à des campagnes de sensibilisation pour leur collecte. Il existe trois (3) autres méthodes pour la récupération des produits selon Guide (2000). Premièrement, des courtiers spécialisés en pièces usagées stockent les produits qui ne peuvent plus être mis sur le marché. Ces intermédiaires spéculent sur ces pièces. Les produits obtenus sont souvent coûteux à réparer dû à leur mauvais état. Deuxièmement, une tierce entreprise peut servir à mettre en relation les consommateurs et l'entreprise. Ces entreprises sont rares et sont pour la plupart spécialisées dans les véhicules à moteur. Le troisième moyen d'obtenir des produits est les stocks de rebuts chez le fabricant original.

1.6.6 Complication des restrictions d'assortiments de matériel

Il est possible que dans certains cas, le client exige que le produit qu'il reçoive soit le même que celui qu'il a retourné. Ceci est courant dans le cas où on doit assurer la fiabilité de l'assemblage mécanique comme par exemple les moteurs d'avions. Un produit peut être composé de pièces communes et de pièces spécifiques. Cette caractéristique complique la planification des ressources, le contrôle de la production et la gestion des matériaux. Les pièces communes sont des pièces standard qui peuvent être utilisées dans différents produits. Cela exige de coordonner les activités de désassemblage avec celles de la réparation et de réassemblage. Une partie non négligeable des entreprises selon l'enquête de Guide (2000) se fient aux pièces fournies par les clients. Cette caractéristique a l'avantage d'éviter l'acquisition de produits selon des prévisions. Elle a le désavantage de travailler sur un horizon court et donc une faible visibilité pour les pièces de rechange. Ainsi, ces dernières sont plus coûteuses car commandées dans de brefs délais.

Le fait de tracer des pièces peut impliquer de retarder certaines commandes. Selon l'enquête de Guide (2000) auprès des industries de réparation, les entreprises produisant sur la demande sont moins sujettes à utiliser un MRP. Elles utilisent plutôt des points de commande pour les pièces peu dispendieuses. Les pièces de rechange dispendieuses ne sont commandées que lorsque nécessaire. De nombreuses entreprises font leur approvisionnement après la réception du produit retourné. Pour obtenir des temps de réparation raisonnables, ces entreprises ont ponctuellement un excès des ressources critiques. Les pièces communes sont amenées au réassemblage par lots alors que les autres pièces ont une règle de priorité (Guide, 2000).

1.6.7 Routages stochastiques et temps d'opération hautement variables

Les routages stochastiques sont la conséquence de l'état incertain des produits retournés. Les routages stochastiques ne sont pas purement probabilistes, car ils contiennent des routages connus tels que le nettoyage et des routages probabilistes hautement variables et dépendants de l'état du produit telles les réparations. De plus, les comportements des pièces sont nombreux et divers selon le temps d'utilisation, les conditions d'utilisation et les réparations précédentes. Ainsi, les besoins de réparations seront tout aussi nombreux et divers. La séquence réelle d'un produit n'est pas connue avant la fin du projet (Guide, 2000).

La probabilité qu'une opération soit requise dépend de l'âge et des conditions d'utilisation du produit. Un même type de pièce peut requérir différentes opérations (Guide *et al.* (1997b), Guide *et al.* (1997a), Guide Jr. *et al.*, 2000).

Les temps d'opérations très variables sont aussi la conséquence de l'état incertain des produits retournés. Les opérations de remplacement et de réparation sont les plus variables car elles sont sujettes aux conditions de travail et à l'expertise du personnel.

Les goulots changeants sont des phénomènes fréquents dans cet environnement et sont dus aux MRR variables, aux temps d'opération variables et aux routages stochastiques. Cela rend la planification des ressources et l'estimation des flux très difficiles.

Les opérations de nettoyage représentent près de 20 % du temps total passé dans le système (Guide, 2000). Avant de nombreuses opérations, les pièces doivent repasser par une opération de nettoyage qui est difficile à cause de la diversité des matériaux et des tailles de pièces. Ceci complique la prévision des temps de changement de série.

1.6.8 Diverses sources d'incertitudes

Dans le secteur de l'aéronautique, trois (3) ressources critiques peuvent être identifiées. Tout d'abord, la main d'œuvre est une ressource cruciale car les employés sont amenés à prendre des décisions lors des inspections et à assurer une gamme étendue d'opérations de réparation. L'expertise des employés est un facteur majeur des systèmes de réparation. Ensuite, les outils sont une ressource critique étant donné le nombre et la diversité des opérations pouvant être requises. Chaque réparation nécessite un équipement spécifique. Enfin, l'espace est la troisième ressource critique car les produits tels que les moteurs d'avions sont très complexes et volumineux. On peut citer aussi l'exemple des chantiers navals où les contraintes d'espace sont prédominantes (Keizers *et al.*, 2001).

À l'inverse des usines de fabrication, les temps de changement de séries sont négligeables par rapport aux temps d'opérations. En effet, les temps de manutention et de changement de séries sont peu évoqués dans la littérature existante. De plus, le nombre d'opérations est très grand.

Les processus de MRO dans les domaines aéronautiques et ferroviaires ont en commun de traiter des produits dont le coût initial (coût d'achat) est élevé. Ces produits sont complexes (nombreux composants). La variabilité de l'étendue du travail est importante.

CHAPITRE 2

PROCESSUS DE DÉSASSEMBLAGE/ASSEMBLAGE

2.1 Désassemblage

Le désassemblage occupe une part de plus en plus importante dans la littérature. Deux (2) courants dominent les études précédentes. Tout d'abord, la modélisation du désassemblage s'est penchée sur la représentation des séquences de désassemblages possibles. L'autre majeure partie des études a porté sur la planification du désassemblage. Il s'agit de déterminer la séquence de désassemblage optimal selon des critères de coût, de profit ou de temps d'opération.

2.1.1 Modélisation du désassemblage

Quatre (4) catégories de méthodes peuvent être distinguées. Ces méthodes sont : le *Graphe des composants et attaches*, le *Graphe orienté*, le *Graphe ET/OU* et le *Réseau de Pétri*. Dans cette section, ces différents outils seront illustrés par l'assemblage d'une lampe de poche (voir Figure 2).

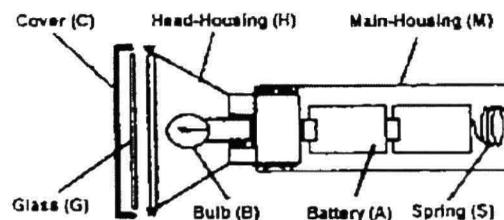


Figure 2 Lampe de poche
(Extrait de Tang, 2001)

Le *Graphe des composants et attaches* est aussi appelé le graphe des connexions (voir Figure 3). Les nœuds de ce graphe représentent les composants de l'assemblage et les

côtés représentent les liens entre les composants. Ce graphe est aussi représenté sous la forme de deux matrices E et F (voir Figure 4). La matrice E traduit la connectivité des composants; un élément de la matrice vaut 1 si les composants sont liés, 0 sinon. La matrice F traduit les attaches entre composants; un élément de la matrice vaut le nombre d'attaches qui relient les composants (0 s'il n'y en a pas). On note la redondance de la matrice E. En effet, si la matrice F est connue alors la matrice E est calculable. La matrice E contient moins d'informations que F puisqu'elle ne précise pas le nombre de liaisons.

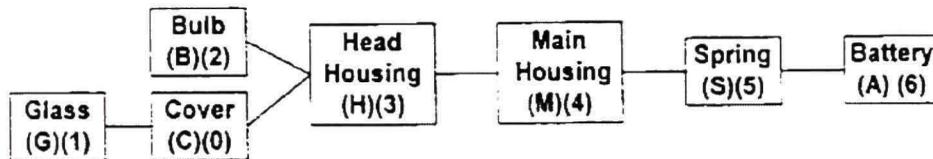


Figure 3 Graphe des composants et des attaches de la lampe de poche (Extrait de Tang, 2001)

$$E = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 1 & 0 & 1 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 \end{bmatrix} \quad F = \begin{bmatrix} 0 & 2 & 0 & 2 & 0 & 0 & 0 \\ 2 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 2 & 0 & 1 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 \end{bmatrix}$$

Figure 4 Matrice de connectivité, E, et matrice des attaches, F, (Extrait de Tang, 2001)

Le *Graphe orienté* donne simplement toutes les séquences possibles de désassemblages (voir Figure 5). Un nœud traduit l'état du désassemblage. Un côté traduit une tâche de désassemblage. La taille de ce graphe augmente avec le nombre d'attaches. Ainsi, le pire des cas est lorsque chaque composant est lié à tous les autres composants.

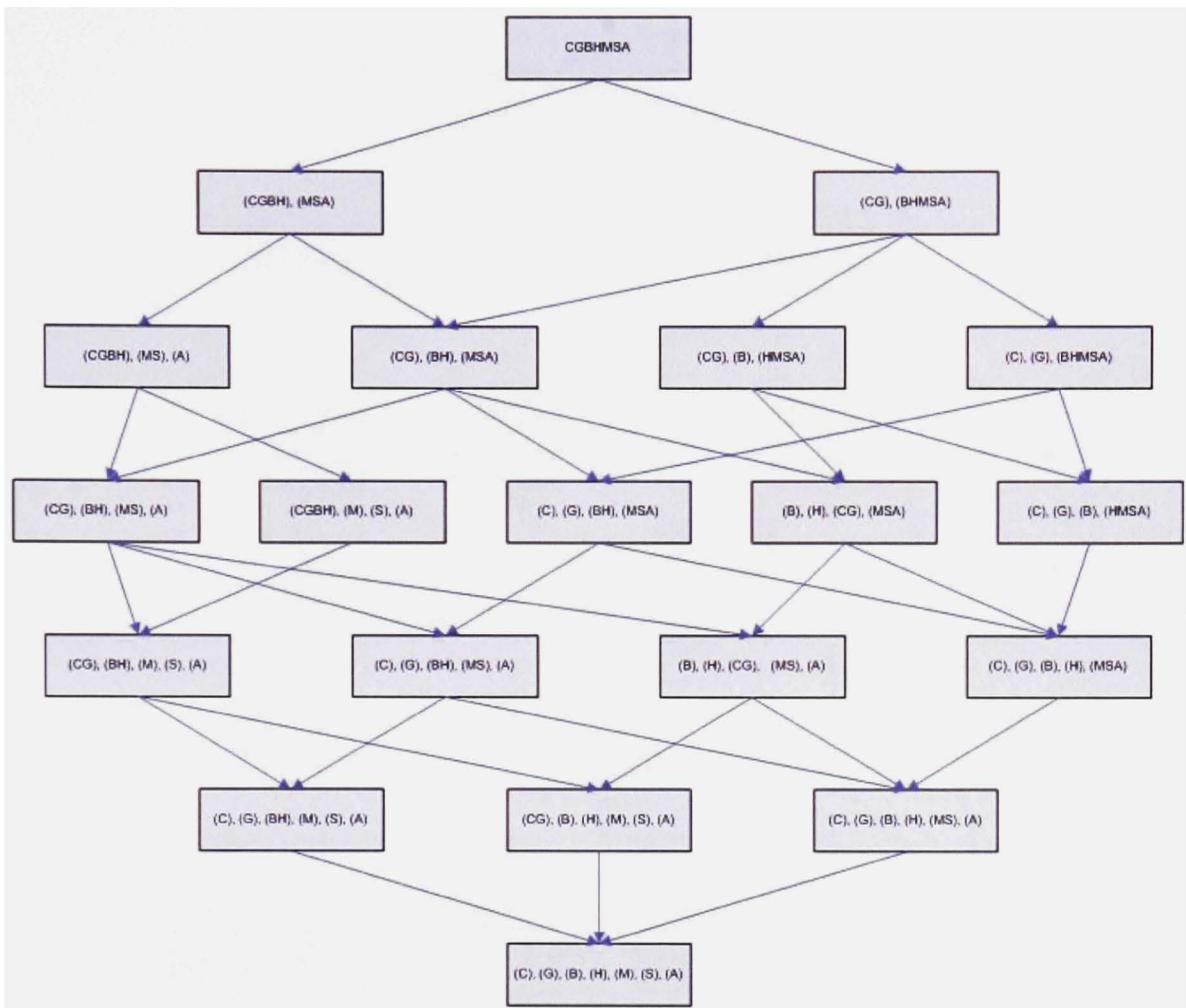


Figure 5 Graphe orienté de la lampe de poche
(Extrait de Tang, 2001)

Le *Graphe ET/OU* traduit aussi l'ensemble des processus de désassemblage possibles (voir Figure 6). Un nœud peut représenter l'assemblage, un sous-assemblage ou un composant. Les côtés nommés hyper-arcs représentent un ensemble d'opérations de désassemblage. Le graphe ET/OU est plus petit que le graphe orienté.

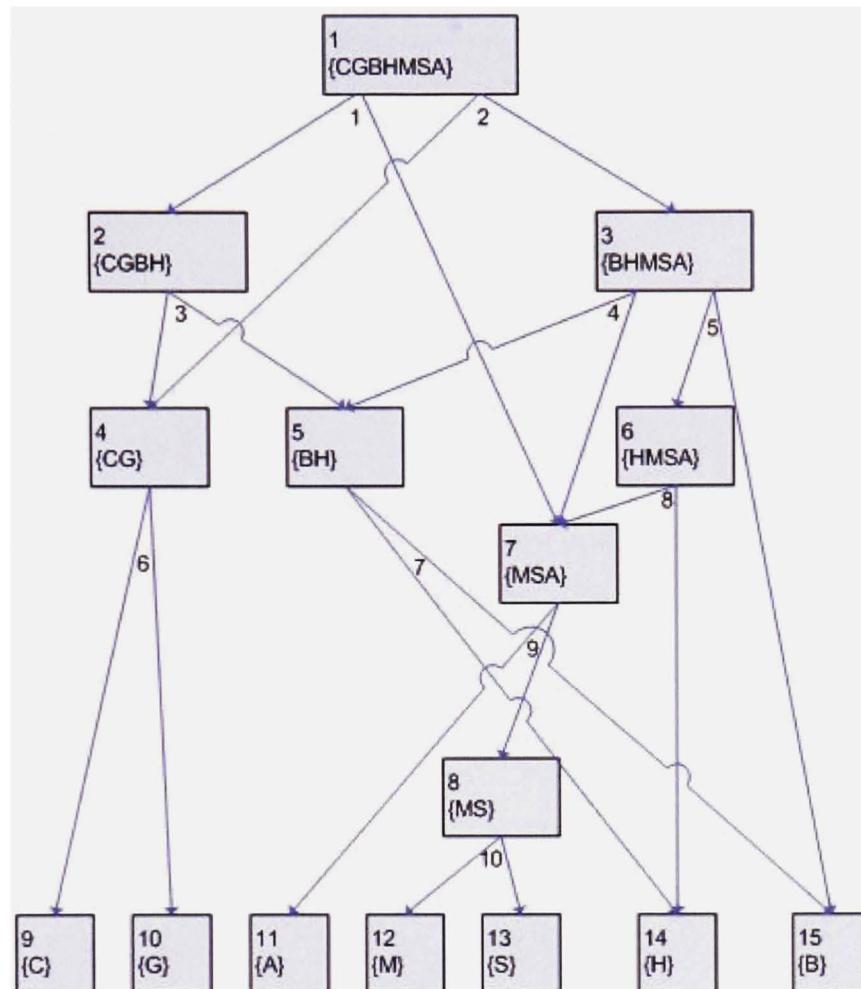


Figure 6 Graphe ET/OU de la lampe de poche
(Extrait de Tang, 2001)

Les *Réseaux de Pétri* peuvent représenter les processus de désassemblage (voir Figure 7). On distingue donc des places et des transitions. Les places représentent le produit, les sous-assemblages et les composants. Les transitions représentent les activités de désassemblage. D'autres éléments peuvent compléter le graphe comme une fonction coût des places (valeur résiduelle des composants), une fonction coût associée à une transition ou une probabilité de succès d'une transition (i.e. une opération de désassemblage). Le réseau de Pétri est une variante des graphes ET/OU. Les transitions permettent une planification dynamique du désassemblage.

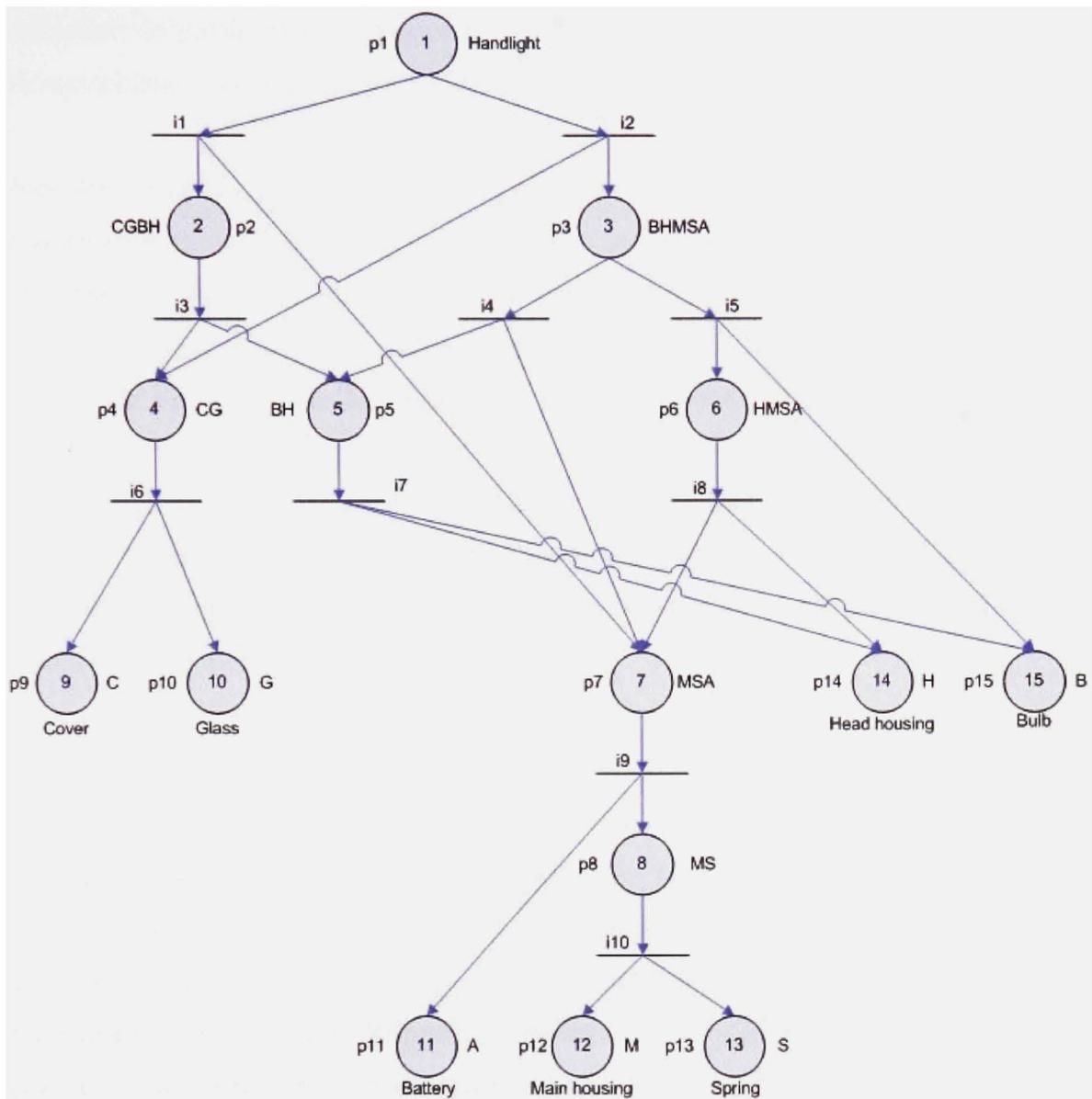


Figure 7 Réseau de Pétri de la lampe de poche
(Extrait de Tang, 2001)

2.1.2 Planification du désassemblage

L'objectif de la planification est de déterminer la séquence optimale qui commence avec le produit et finit avec les pièces souhaitées désassemblées. Les critères peuvent être multiples : minimiser les changements d'outils, les coûts, le temps de désassemblage ou

maximiser le profit. Deux (2) questions majeures sont posées : quel est le niveau de désassemblage et quelle est la séquence optimale ?

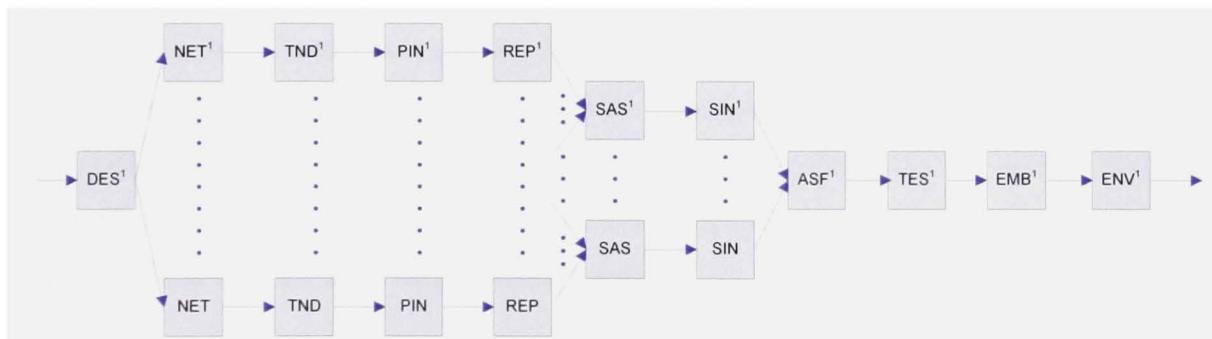
Pour déterminer le niveau de désassemblage, la plupart des études ont pour critère de performance la rentabilité du désassemblage. Est-ce que les pièces désassemblées génèrent plus de profit que le coût de l'opération de désassemblage ? Des critères qualitatifs et quantitatifs ont pu être utilisés. Des études ont considéré la probabilité d'échec de l'opération de désassemblage. Le revenu de l'opération de désassemblage prend alors en compte cette éventualité. Une fois le niveau de désassemblage fixé, on détermine la séquence optimale par un critère de coût ou de temps en suivant le même principe. Le plus généralement, le problème est NP-difficile et différentes heuristiques sont mises en place afin de trouver la meilleure solution possible en parcourant les graphes de désassemblage.

2.1.3 Sommaire

Les méthodes de modélisation du désassemblage vues précédemment se basent sur l'étude structurelle des produits. Selon les contraintes géométriques, on génère une séquence de désassemblage. Le processus de désassemblage est défini comme une suite séquentielle d'activités. Les désassemblages destructifs, ou opérations de désassemblage échouées, ne sont pas considérées comme des opportunités de limiter les désassemblages. En outre, on remarque le manque d'intégration des opérations lors du désassemblage. Il n'est généralement pas réaliste de supposer que le produit est totalement désassemblé avant d'être traité. Ceci entraîne des temps d'attente inutiles et donc des produits encours indésirables. La nature dynamique du désassemblage est peu traitée. Les études précédentes font des prévisions en supposant un caractère probabiliste pour les activités et les composants.

2.2 Description des étapes principales d'un PD/A

Lors des processus de réfection (réparation et remise à neuf d'un moteur d'avion par exemple), les séquences ne sont pas connues à l'avance mais leur typologie est généralement la même. En d'autres termes, la séquence des types d'opération est similaire d'un cas à un autre. En effet, il est facile de déterminer les étapes principales du PD/A. Ces étapes sont (dans le cas d'un moteur d'avion) : désassemblage, nettoyage, test non-destructif, première inspection, réparation, sous-assemblage, seconde inspection, assemblage final, test, emballage et envoi chez le client (voir Figure 8). Le schéma de cette séquence est clairement asymétrique. D'abord, on assemble les sous-assemblages avant d'assembler le produit fini puis de l'expédier chez le client. Lors des études précédentes, l'atelier était représenté de façon symétrique et non-détaillée (voir Figure 9). Les routages stochastiques ont incité à employer la simulation et donc la représentation des flux est peu applicable ou peu généralisable à d'autres cas.



(1) Légende

| | | | |
|-------------------------|-------------------------|------------------------|---------------|
| DES Désassemblage | PIN Première Inspection | SIN Seconde Inspection | EMB Emballage |
| NET Nettoyage | REP Réparation | ASF Assemblage Final | ENV Envoi |
| TND Test Non-Destructif | SAS Sous-Assemblage | TES Test final | |

Figure 8 Étapes principales d'un processus de désassemblage/assemblage

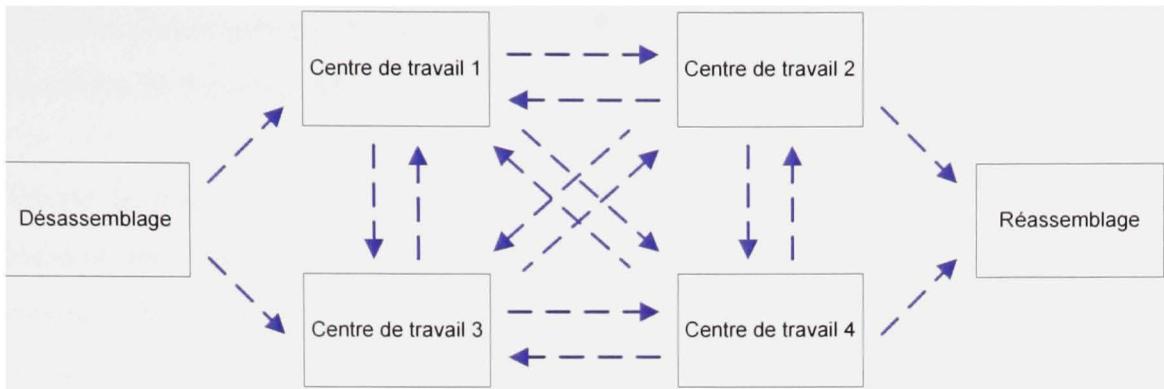


Figure 9 Représentation symétrique d'un processus de désassemblage/assemblage (Adapté de Guide Jr. *et al.*, 2000)

Le désassemblage est une opération dont les temps d'extraction de chaque composant du produit sont connus et varient peu pour un même produit. Cependant, le temps total de désassemblage varie selon les commandes. S'il s'agit d'une commande exceptionnelle telle qu'un bris, alors le désassemblage se résume au démontage du produit jusqu'à trouver les composants défectueux à réparer. En revanche, s'il s'agit d'une commande habituelle telle qu'une révision, alors le désassemblage consiste au démontage complet du produit afin de réviser chaque composant. Dès que cette opération est effectuée, les contraintes d'espace rentrent en ligne de compte. Les assemblages complexes peuvent contenir un grand nombre de pièces volumineuses. En effet, l'espace est une ressource critique dans le cadre de la réfection aéronautique.

Le nettoyage est une opération dont le temps connu varie peu pour une même pièce. Cependant cette opération constitue une grande partie du temps passé dans le système, soit près de 20 % (Guide, 2000). Le nettoyage est une étape importante car elle prépare les pièces pour les opérations suivantes.

Le test non-destructif a une durée connue mais peut varier sensiblement avec la difficulté à trouver le ou les défauts. Son diagnostic permet une première estimation des réparations à effectuer. Il faut déterminer à ce point quelles sont les décisions prises.

Certaines pièces peuvent être inutilisables, une commande pour de nouvelles pièces ou des pièces de rechange doit être passée.

Ensuite la pièce subit une première inspection. Cette inspection doit aboutir à une décision sur l'étendue des réparations à faire. En d'autres termes, elle détermine la séquence des opérations à suivre et la charge de travail pour chaque opération. Cette opération requière des inspecteurs qualifiés et expérimentés afin de fournir des diagnostics précis et fiables.

Puis, c'est au tour des réparations déterminées par l'inspection et le contrôle non-destructif. La variabilité de la durée de cette étape est élevée. De plus, le personnel doit être hautement qualifié afin d'être en mesure d'effectuer toutes les réparations possibles. La période de formation et d'apprentissage est relativement longue. Par ailleurs, les outils peuvent être spécifiques à chaque opération et par conséquent représenter une ressource critique. C'est donc une étape dispendieuse.

Les sous-assemblages sont des opérations dont les durées connues varient de façon significative selon les différentes opérations de réparation. En effet, la durée du sous-assemblage dépend des stratégies de mise en disponibilité des pièces. Il peut débiter lorsque toutes les pièces du plus bas échelon de la nomenclature du produit sont disponibles ou il ne peut s'exécuter que lorsque toutes les pièces du produit sont disponibles. Les stratégies de mise en disponibilité sont nombreuses.

Par la suite, une deuxième inspection permet de vérifier que tous les défauts ont été correctement corrigés ou si certains défauts ont été oubliés. La seconde inspection est une prise de décision sur la suite des opérations : réparations supplémentaires ou continuation à la prochaine étape. Le principe de fonctionnement est le même que celui vu précédemment lors de la première inspection ou du test nondestructif : des pièces peuvent être mises au rebut ou demander une réingénierie.

En suivant, se déroule l'assemblage final qui, comme le sous-assemblage, a une durée dépendante des opérations précédentes et des stratégies de mise à disposition. Une partie de l'assemblage peut se faire en temps caché si l'assemblage débute lorsque les pièces du plus bas niveau de la nomenclature de produits sont disponibles. Ceci contribue à minimiser le temps de passage dans le système.

Le test final est la dernière étape qui vérifie si le produit est fonctionnel ou non. Le produit est-il prêt à être envoyé au client ? Un diagnostic aboutit à une réponse.

Enfin, les deux (2) dernières opérations sont l'emballage et l'envoi. Ces opérations ont une durée connue qui varie très peu. Par conséquent, dans la suite de cette étude, la date d'exigibilité est considérée comme le temps d'achèvement du test final, car les étapes du désassemblage jusqu'au test final sont les sources de la variabilité du PD/A.

2.3 Prévion des résultats d'inspections

À partir de la section précédente, un nouveau modèle peut être mis en place. Comme il a été discuté ci-dessus, les inspections et les tests sont les sources d'augmentation et de découverte de charge de travail. Par conséquent, ces étapes doivent être considérées différemment des autres activités. Les autres activités peuvent être décrites par une durée, une stratégie de mise à disposition et un niveau de maintenance (taux moyen de pannes, *etc.*). Les origines de la variabilité peuvent être décrites par une activité qui résulte dans le choix entre plusieurs alternatives. Par conséquent, les inspections et les tests peuvent être décrits comme l'association d'une activité et d'une décision. L'activité peut être décrite comme un processus d'opérations élémentaires, un réseau de nœuds d'activités. La décision est représentée par un nœud de décision donnant le choix entre plusieurs alternatives. Les alternatives sont les processus suivants, des réseaux d'activités, requis par les pièces examinées.

Les opérations de démontage comportent aussi des processus de décision. Il peut arriver qu'un composant ne soit pas démonté. Alors toutes les activités qui s'en suivent n'auront pas lieu. Ceci peut arriver pour trois (3) raisons différentes : l'assemblage est indémontable, l'assemblage est nonréparable ou le composant défectueux est connu et ne fait pas partie de cet assemblage.

- a. Premier cas : L'assemblage est indémontable. S'il n'est pas défectueux, il est conservé jusqu'au réassemblage. S'il est défectueux, il faut soit le sous-traiter, soit en fournir un neuf ou en posséder un de rechange.
- b. Deuxième cas : L'assemblage est non-réparable. Il peut être sous-traité ou alors, un assemblage neuf ou de rechange est fourni.
- c. Troisième cas : Lors d'une réparation urgente, l'assemblage ne contient pas le composant défectueux désigné, il n'est donc pas démonté et sera réassemblé ensuite.

À partir d'un historique des inspections et des commandes précédentes, il est possible de déterminer chaque processus. Tout d'abord, on décompose l'inspection en opérations élémentaires. On peut tracer le réseau des activités qui représente les contraintes de précédences entre chaque activité. Pour chaque opération élémentaire, on construit un historique du temps d'opération. À partir de cet historique, des logiciels d'estimation de distribution déterminent la distribution du temps d'opération. Enfin, on détermine les alternatives proposées auparavant. Les réponses aux questions suivantes sont nécessaires pour l'analyse du PD/A :

- a. Quelles sont les décisions, i.e. séquences, possibles ?
- b. Quelles sont les lois qui régissent l'occurrence de chaque décision ?

Pour chaque alternative, on reproduit la méthodologie vue précédemment pour obtenir le réseau des activités. Finalement, il ne reste plus qu'à mettre en place la planification des alternatives. La méthode la plus courante est l'étude de cas. Il s'agit d'établir une

causalité entre les événements. Cette technique aboutit à l'élaboration d'un ensemble de règles du type « Si [...], alors [...] » et/ou d'une distribution des probabilités d'occurrence si aucune causalité n'est mise en évidence. Finalement, il est possible à l'aide d'un logiciel de prédiction de maintenance de déterminer la séquence espérée. Ainsi, on passe d'un modèle stochastique à un modèle déterministe. Une fois la commande traitée, le logiciel peut être mis à jour.

2.4 Normes de la nomenclature

Le désassemblage et l'assemblage apportent un autre problème. Il est difficile d'organiser et d'ordonner les disponibilités de tous les composants à être démontés ou assemblés du fait que les réparations peuvent être très différentes. Pour l'approvisionnement, de nombreuses entreprises utilisent le plan des besoins matières (*Material Requirement Planning*, MRP). Cet outil ordonne et planifie l'approvisionnement tout en assurant la séquence d'assemblage. L'inconvénient de cette méthode est la non-considération des événements incertains. Un autre inconvénient est que le MRP est une méthode dirigée. Le MRP représente le produit dans sa phase d'assemblage uniquement. Le MRP est construit par explosion de la nomenclature de produits (*Bill of Materials*, BOM). L'explosion de la nomenclature permet de définir tous les éléments fonctionnels et leurs précédences hiérarchiques.

Le Tableau II présente la nomenclature pour l'exemple de la lampe de poche (voir Figure 2). Le niveau de l'assemblage permet de savoir quel composant en compose un autre. Par exemple, les éléments dont le niveau d'assemblage est 02 sont des composants de l'assemblage de niveau 01, c'est-à-dire de la lampe de poche.

Tableau II

Nomenclature de la lampe de poche

| Niveau de l'assemblage | Numéro de pièce | Description de la pièce |
|------------------------|-----------------|-------------------------|
| 01 | 1 | Lampe de poche |
| 02 | 11 | Tête de lampe |
| 02 | 12 | Corps de la lampe |
| 02 | 13 | Piles |
| 02 | 14 | Ressort |
| 03 | 111 | Verre |
| 03 | 112 | Capot |
| 03 | 113 | Ampoule |
| 03 | 114 | Logement de l'ampoule |

La Figure 10 illustre la nomenclature explosée de la lampe. La nomenclature explosée constitue une bonne base pour analyser le flux des composants et déterminer la disponibilité de chacun. Nous allons adapter la nomenclature explosée afin de résoudre les problèmes cités auparavant.

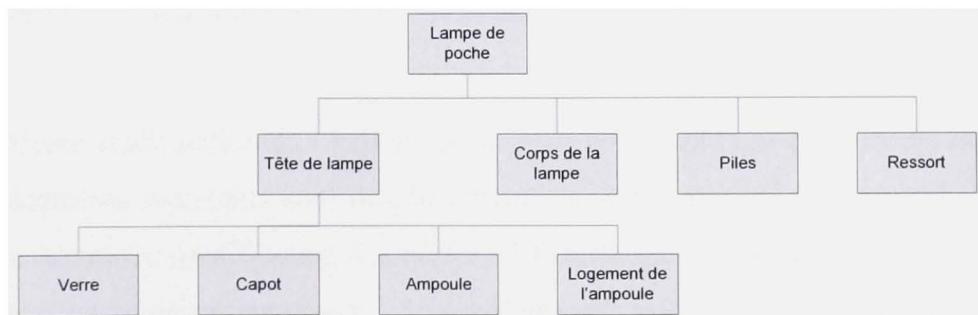


Figure 10 Nomenclature explosée de la lampe de poche

La première amélioration de la nomenclature explosée (EBOM) vise à considérer l'assemblage et le désassemblage (voir Figure 11). Un niveau de l'EBOM représente des pièces. Le niveau inférieur représente les composants de ces pièces. Les lignes représentent les liens qui unissent les pièces et leurs composants. Par conséquent, les lignes traduisent un désassemblage quand l'EBOM est lu du haut vers le bas. A l'inverse,

les lignes traduisent un assemblage quand l'EBOM est lu du bas vers le haut. Il doit être noté que la séquence de désassemblage n'est pas l'inverse de la séquence d'assemblage du moment où les produits ne sont pas forcément conçus pour être démontés. En outre, une opération de désassemblage n'est pas nécessairement l'inverse de l'opération d'assemblage. Par exemple, certaines pièces peuvent être indémontables. De plus, les lignes sont à considérer comme des séquences d'opérations et par conséquent, des pièces appartenant à un même composant ne sont pas forcément disponibles en même temps. Chaque pièce peut être démontée ou assemblée à la suite d'une opération différente.

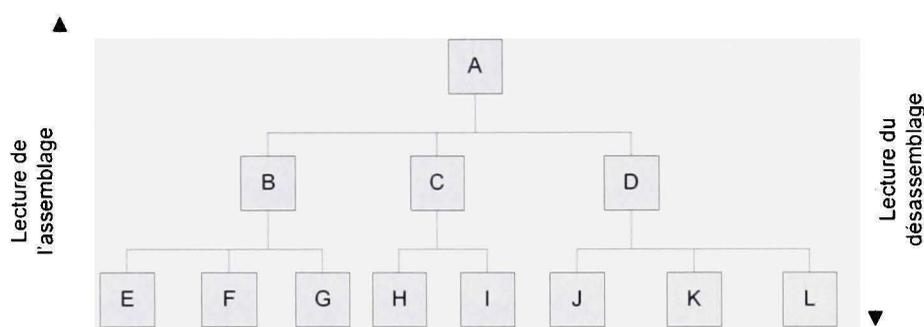


Figure 11 Sens de lecture pour les processus de désassemblage et d'assemblage

La deuxième amélioration de l'EBOM est la prise en compte des événements incertains. Ces événements incertains sont dus aux prises de décisions lors des inspections et des tests. La deuxième modification à apporter à l'EBOM est l'intégration des inspections et des tests dans les représentations. L'EBOM présente tous les composants et donc aussi ceux qui sont inspectés ou testés. L'EBOM est un moyen efficace d'introduire les inspections et les tests dans le flux des matières. Les inspections et les tests seront modélisés par un nœud d'activité et de décision. Les inspections et les tests durant l'assemblage ou le désassemblage d'un composant ne sont pas les mêmes. Le symbole des inspections et des tests doit être directionnel pour distinguer ces différentes opérations (voir Figure 12). Ni le carré, symbole d'une décision utilisé dans les arbres de décision, ni le losange utilisé dans les diagrammes des processus ne seront donc utilisés.

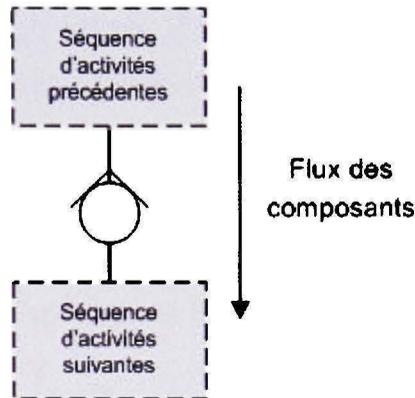


Figure 12 Symbole de l'inspection d'un composant

Entre la séquence des activités précédentes et la séquence des activités suivantes, la séquence des activités est fonction des décisions prises lors de l'inspection. Les pièces sortant de l'inspection, bonnes ou mauvaises, vont à la séquence des activités suivantes qui les dirigera vers les stations de travail appropriées.

2.5 Intégration des tests et des inspections

Cette section décrit comment introduire dans l'EBOM les inspections et les tests. Pour cela, on doit répondre à quelques questions :

- a. Quel composant est inspecté ou testé ?
- b. Quand le composant est inspecté ou testé ? Lors du désassemblage ou de l'assemblage ?

Ces deux (2) questions aident à placer le nœud des inspections et des tests. La première question permet de déduire la ligne sur laquelle placer le nœud des inspections. La seconde question fournit la direction du nœud des inspections. Par exemple, les réponses à la première question à propos du produit de la Figure 11 sont : B, C, D, E, F, G, H, I, J, K et L (voir Figure 13). Les inspections i1 à i3 sont des inspections lors du

désassemblage. Les inspections i_4 à i_{11} sont associées aux réparations des pièces E, F, G, H, I, J, K et L. Les inspections i_1 , i_2 , et i_3 vérifient le fonctionnement des composants mais aussi leur démontabilité. Par conséquent, il est possible qu'une pièce des composants B, C ou D ne soit pas démontable. À l'inverse, le produit A est toujours désassemblé entièrement en ses composants : B, C et D. La réponse à la deuxième question est que toutes les pièces sont inspectées durant le désassemblage et que le sous-assemblage D est inspecté durant le réassemblage : inspection i_{12} . Le schéma obtenu est le suivant :

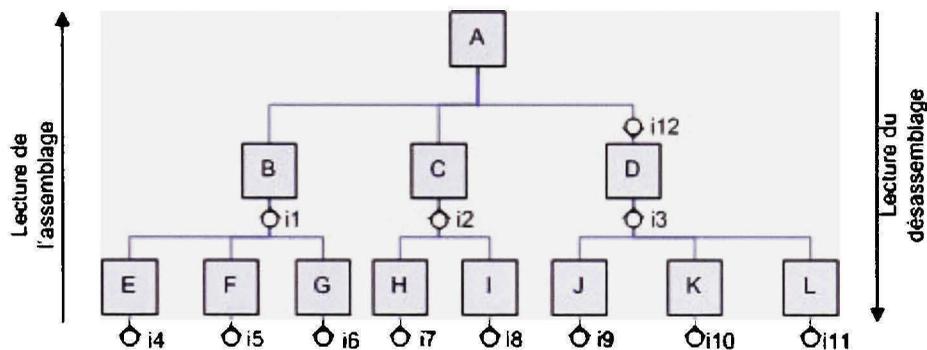


Figure 13 Processus de désassemblage/assembleage avec les nœuds de décisions

Pour chaque opération, une feuille de route (BOMfr), créée par Yeh (1995) et qui est une sorte de diagramme du processus, représente les flux de matériaux et la séquence des activités (voir Figure 14A à Figure 14F)). À droite de chaque pièce est rajouté l'inspection ou le test qu'elle subit. Finalement, un réseau des activités (*Activities-On-Nodes*, AON) peut être obtenu (voir Figure 14G) en connectant tous les BOMfr. Les nœuds du réseau sont les activités et les arcs les matières.

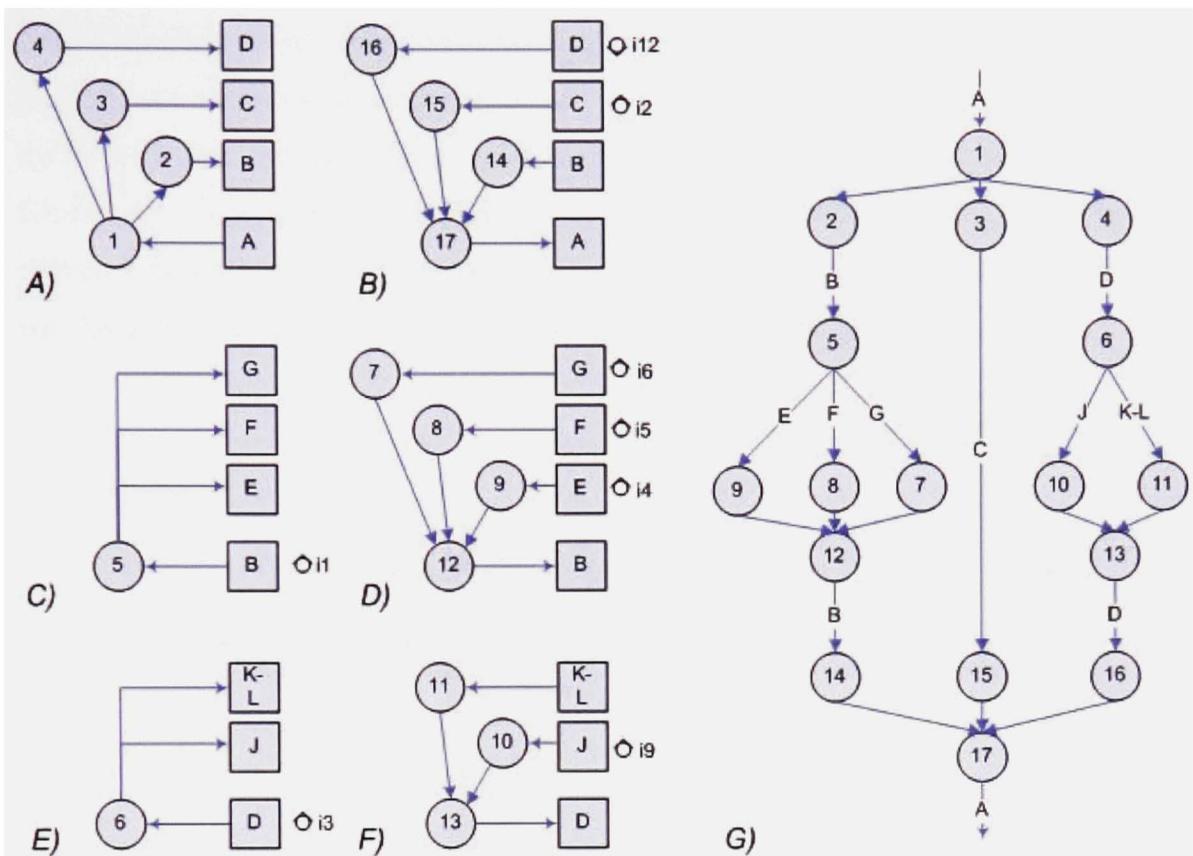


Figure 14 A) Désassemblage du produit A, B) Réassemblage du produit A, C) Désassemblage du composant B, D) Réassemblage du composant B, E) Désassemblage du composant D, F) Réassemblage du composant D et G) Réseau d'activités

Si un assemblage n'est pas désassemblé alors ses composants ne seront pas parcourus lors de la lecture de l'EBOM. Par exemple à la Figure 14, l'inspection i2 révèle que l'assemblage C est indémontable. Alors les composants H et I ne seront pas parcourus lors de la lecture de l'EBOM. Ceci souligne le fait aussi que dès la réception de la commande, l'EBOM peut être réduit. En effet, si on connaît d'avance qu'un assemblage est indémontable, il est alors utile de ne pas représenter les niveaux inférieurs de cet assemblage pour plus de clarté. De même lors des réparations urgentes, les assemblages qui ne seront pas démontés peuvent être réduits en ne représentant pas leurs composants.

Dans l'exemple ci-dessus, le désassemblage de C est impossible et par conséquent les pièces H et I n'apparaissent pas dans les BOMfr. De plus, durant le désassemblage de D, les pièces K et L ont été endommagées et de nouvelles pièces sont commandées chez un fournisseur. Ceci illustre la dépendance entre les nœuds d'inspections. À cause des décisions prises aux inspections i2 et i3, les inspections i7, i8, i10 et i11 n'apparaissent pas. La description détaillée des activités est disponible dans Tableau III.

Tableau III

Description détaillée des activités

| Numéro des activités | Description des activités |
|----------------------|---------------------------------|
| 1 | Nettoyage du produit A |
| 2 | Extraction du composant B de A |
| 3 | Extraction du composant C de A |
| 4 | Extraction du composant D de A |
| 5 | Désassemblage de B |
| 6 | Désassemblage de D |
| 7 | Traitement et réparation de G |
| 8 | Traitement et réparation de F |
| 9 | Traitement et réparation de E |
| 10 | Traitement et réparation de J |
| 11 | Traitement et réparation de K-L |
| 12 | Assemblage de E, F et G |
| 13 | Assemblage de J |
| 14 | Assemblage de B avec C et D |
| 15 | Assemblage de C avec B et D |
| 16 | Assemblage de D avec B et C |
| 17 | Nettoyage et emballage de A |

L'utilisation du graphe obtenu doit être rigoureuse. Certaines informations implicites peuvent mener à des erreurs. Tout d'abord, les arcs disjonctifs sont absents du diagramme. En effet, les arcs disjonctifs représentent le respect des capacités. Ceci se traduit par le fait qu'un poste ne peut traiter au maximum qu'une seule commande à la fois. De plus, ce graphe ne tient pas compte de l'état actuel du système de production.

2.6 Problématique

Cette partie a mis en évidence la complexité du processus, la difficulté à modéliser celui-ci et donc la difficulté à planifier et ordonnancer les commandes. À partir de ces observations, quelques recommandations peuvent être suggérées. Une meilleure intégration entre la prévision de la maintenance et l'ordonnancement permettrait une gestion efficace des flux et des stocks. De plus, la précision des prévisions des opérations influence directement les risques de retards et de conflits entre les différentes ressources. Dans la suite de notre étude, nous nous attacherons exclusivement à la problématique de l'assignation des dates d'exigibilité qui se produit avant que le processus de désassemblage/assemblage ait eu lieu.

CHAPITRE 3

LES MÉTHODES D'ASSIGNATION DES DATES D'EXIGIBILITÉ

3.1 Revue de la littérature

Les méthodes d'assignation des dates d'exigibilité peuvent se distinguer en trois (3) grandes familles :

- a. Méthodes analytiques;
- b. Méthodes empiriques;
- c. Méta-heuristiques.

Le domaine des méthodes analytiques concerne les règles et les algorithmes qui ne nécessitent pas d'expérimentation préalable pour tester ou paramétrer ces méthodes. Les méthodes empiriques sont basées sur les historiques de données. Les méta-heuristiques sont des heuristiques itératives qui utilisent des règles de permutations et de branchement afin de trouver de bonnes solutions pour les problèmes d'optimisation.

3.1.1 Méthodes analytiques

Cheng (1994) s'est penché sur une méthode analytique pour déterminer les dates d'exigibilité dans une usine d'assemblage. Les dates d'exigibilité sont calculées selon la règle de la charge de travail total (TWK, *Total Work Content*). La section 3.2.2.2 présente cette méthode en détails. Les coefficients de cette formule sont calculés à partir du chemin critique des activités. Leurs expérimentations soulignent les différences significatives de précision dans les dates d'exigibilité selon la complexité de la structure des produits.

Li et Cheng (1999) considèrent une machine sur laquelle plusieurs commandes sont déjà ordonnancées. Les dates d'exigibilité de ces commandes sont considérées comme des paramètres alors que les dates d'exigibilité des commandes entrantes sont les variables de décision. Le problème visant à déterminer les dates d'exigibilité pour les nouvelles commandes est NP-complet. Si les pénalités pour les vieilles commandes sont égales et si elles le sont aussi entre les nouvelles commandes, le problème peut alors être résolu à l'aide d'un algorithme polynomial³.

Avec le *Program Evaluation and Review Technique* (PERT), Pontrandolfo (2000) permet de déterminer la durée d'un projet d'activités indépendantes. Un algorithme est déterminé pour calculer l'espérance et la variance du temps de finition du projet. Il s'agit d'un graphe des états du projet où les transitions sont calculées en fonction des distributions des temps d'activité. Cependant, le diagramme peut être très grand. Par conséquent, Fatemi Ghomi et Rabbani (2003) ont développé une méthode de contraction du graphe. Ils proposent aussi une nouvelle approximation de la fonction de distribution de la durée du projet.

Keizers *et al.* (2001) définissent un modèle markovien à deux (2) dimensions pour un centre de réparation ayant plusieurs serveurs en parallèle. Des commandes urgentes peuvent apparaître au cours des opérations. La moyenne et l'écart-type du temps de travail restant sont calculés. Une approximation a été faite dans le cas où les temps d'opération des serveurs ne sont pas identiques. Le but de cette approche est de calculer la probabilité de finir les projets avant une date d'exigibilité fixée. La méthode employée donne les solutions exactes lorsque les serveurs sont identiques. L'approximation pour des serveurs différents donne aussi des solutions satisfaisantes selon les scénarios étudiés.

³ Un algorithme est dit polynomial si le nombre d'opérations élémentaires nécessaires pour résoudre un problème de taille n est une fonction polynomiale de n .

Gordon *et al.* (2002a) présentent une revue des méthodes d'assignation des dates d'exigibilité communes. Ils introduisent une classification utilisant trois (3) champs : l'environnement de travail, les variables de décision et le critère d'optimalité. A chaque type de problème sont spécifiés sa complexité et les algorithmes de résolution existants.

Gordon *et al.* (2002b) étendent leur étude précédente en révisant la détermination des paramètres déterministes des modèles usuelles d'assignation des dates d'exigibilité (DDA) (tels que TWK) dans un environnement de production statique. L'objectif de chaque problème est de déterminer la date d'exigibilité optimale et l'ordonnancement relatif à celle-ci. Ce projet souligne le besoin d'études dans le cas de plusieurs postes de travail, de règles dynamiques et d'objectif multicritère.

Song *et al.* (2002) développent une approximation de la distribution du temps d'assemblage où chaque opération dans le processus d'assemblage suit une distribution de probabilité tronquée. L'originalité de leur étude est de décomposer les assemblages multi-échelons de produits complexes en sous-systèmes à deux (2) échelons pour lesquels deux (2) distributions du temps de finition, exacte et approximative, sont développées. Cette technique est ensuite appliquée récursivement pour mener à l'approximation de la distribution du temps de finition du produit. L'approximation utilisée s'est révélée meilleure que l'approximation par la distribution normale. La méthode est applicable à un large nombre d'entreprises où elle serait une source de bénéfice direct.

Azaron et Kianfar (2006) modélisent une usine d'assemblage multi-échelons comme un réseau de files d'attente avec des distributions de temps exponentielles pour les temps de traitement et des distributions Erlang pour les temps de transport. Les arrivées des commandes sont modélisées selon un processus de Poisson. Les taux de service sont contrôlables. Il s'agit d'un problème de contrôle optimal avec une formulation multi-objectif. La première étape de cette approche est la détermination de la fonction de

densité de probabilité du chemin le plus long en transformant le réseau en un réseau stochastique. La formulation multi-objectif (coût total d'opération, temps de traitement moyen, variance du temps de traitement et probabilité que le temps de traitement n'excède pas un certain seuil) du problème discrétisé n'a besoin de la part des gestionnaires que de la priorité de chaque objectif.

3.1.2 Méthodes empiriques

Lawrence (1995) compare plusieurs distributions (*Normale*, *Erlang généralisée* et *Ramberg-Schmeiser*) pour estimer le temps de passage des commandes et la distribution d'erreur relative. Comme le temps de passage est planifié, la distribution d'erreur est approximée empiriquement. Le but est de trouver le meilleur délai selon les différents critères : retard absolu moyen, retard quadratique moyen, coût total et le niveau de service. Il conclut que les distributions testées sont statistiquement équivalentes.

Moses (1999) introduit un paramètre qui estime un temps-tampon dans les règles paramétriques usuelles (TWK par exemple) afin de tenir compte de la variabilité du système. Cette règle définit les dates d'exigibilité des commandes égales au temps d'arrivée plus le temps de passage et la valeur actuelle du temps-tampon dynamique. Le temps-tampon est ajusté grâce à un système de contrôle en boucle fermée. L'apport de cette étude est la construction d'un contrôleur qui tient compte de l'état du système manufacturier et de son évolution sans être piégé par les variations locales des variables d'état. Cette méthode améliore la précision des règles paramétriques.

Hegedus et Hopp (2001) développent un modèle mathématique pour déterminer une date d'exigibilité pour un système utilisant la méthode MRP. L'usine est sujette à une incertitude d'approvisionnement. En utilisant l'historique des données du MRP, il est possible de déterminer la fonction de distribution du temps d'approvisionnement. Plusieurs règles de décision simples ont été mises en évidence. Par exemple, tant que le

service au client n'atteint pas un certain seuil, la politique optimale est toujours de fixer la date demandée par le client.

Sha et Liu (2005) extraient les données du système de production et de la commande pour établir des règles qui définissent selon chaque cas la valeur des coefficients de la méthode TWK. Les règles sont déduites d'un arbre de décision. Cette approche montre une meilleure précision et une meilleure justesse que les méthodes TWK statique et dynamique.

Lucas et Moses (2005) étudient l'extensibilité et la performance de deux (2) structures d'indexation des données : une structure linéaire et un arbre. Ces données sont utilisées par une méthode d'assignation de dates d'exigibilité en temps réel qui requiert beaucoup d'informations. La performance relative de la structure en arbre par rapport à celle de la structure linéaire augmente lorsque la taille du problème augmente alors que son usage relatif de la mémoire reste constant. La méthode de DDA est très robuste par rapport aux méthodes paramétriques usuelles et démontrent une meilleure précision.

3.1.3 Méta-heuristiques

Wang *et al.* (1999) utilisent une technique contenant un algorithme génétique afin de négocier des dates d'exigibilité entre le manufacturier et ses clients. L'avantage de ce modèle est de résoudre un problème complexe en un temps raisonnable grâce à l'utilisation de l'algorithme génétique et des fonctions floues qui permettent d'allouer les ressources et fixer des dates d'exigibilité acceptables. L'outil développé fournit les pénalités marginales pour les clients qui fixent une date d'exigibilité trop tôt.

Sha et Hsu (2004) construisent un réseau de neurones afin de fixer des dates d'exigibilité. Cette méthode est plus efficace que les méthodes usuelles (comme TWK). La performance du réseau de neurones est meilleure que les méthodes usuelles mêmes

lorsque dans ces dernières les facteurs influants sont choisis selon une analyse statistique. Cependant, leur méthode utilise un historique de données de 92 variables pour l'apprentissage du réseau de neurones. Les auteurs reconnaissent qu'en pratique, il peut être trop dispendieux d'acquérir une telle quantité d'information.

Yildirim *et al.* (2006) présentent des réseaux de neurones en parallèle qui permettent de déterminer la capacité de chaque station de travail dans un environnement manufacturier. De plus, cette méthode détermine la règle de priorité et la date d'exigibilité selon les critères de performance retenus : le temps de passage moyen, le retard moyen, le temps maximal d'achèvement et les taux d'utilisation des machines. L'inconvénient de cette méthode est l'investissement de temps pour l'apprentissage du réseau de neurones et la génération des solutions. Ce temps augmente avec le nombre de variables de décision à calculer.

Watanapa et Techanitisawad (2005) conçoivent un système afin de proposer aux clients un prix et une date d'exigibilité et trouver la séquence la meilleure possible y étant associée. Cette méthode tient compte de la capacité utilisée et des classes de clients selon leur préférence (une date d'exigibilité courte ou un prix faible). L'algorithme se révèle être un moyen efficace de déterminer une séquence optimale ou proche de l'optimale qui maximise le revenu marginal.

3.1.4 Sommaire

Les méthodes analytiques sont très puissantes, mais les nombreuses hypothèses posées les rendent peu applicables. Leur avantage est leur facilité de modification lorsque des paramètres du système varient. Les méthodes empiriques permettent de parfaitement s'intégrer à n'importe quel processus. De plus, elles sont flexibles et permettent la mise en place de mises à jour ou de règles dynamiques. L'inconvénient majeur est leur temps d'implantation qui est onéreux. Au cours de ce projet, plusieurs règles paramétriques

seront développées. Les études précédentes ont focalisées leur attention sur l'interaction entre le critère de performance (le retard moyen absolu, le retard moyen quadratique, le coût. ...) et les règles de priorité, la combinaison de produits, la complexité des produits, et la congestion des systèmes de production. Cependant, la congestion réfère à la capacité des stations de travail. Le but de l'approche présentée ci-dessous est de proposer une étude approfondie de l'influence de la capacité sur les méthodes d'assignation des dates d'exigibilité. La capacité peut être évaluée selon deux (2) mesures : le temps d'ouverture par jour du système de production et le nombre de serveurs en parallèle aux stations de travail. Cette étude explore l'interaction entre le critère de performance, et le nombre de postes en parallèle, le temps d'ouverture du système de fabrication et la variabilité du système.

La suite de ce chapitre présente les méthodes d'assignation des dates d'exigibilité dans le cadre d'un système de réfection. Les méthodes usuelles seront adaptées au contexte d'un système de PD/A. De nouvelles méthodes seront aussi introduites. Enfin, les critères de performances des ces méthodes seront décrits.

3.2 Application des heuristiques usuelles

Cette section décrit les procédures directes usuelles d'assignation des dates d'exigibilité qui seront utilisées lors de la simulation. Ces procédures utilisent deux (2) catégories d'information : les caractéristiques de la commande et les caractéristiques du centre de production. Ces méthodes ont été employées un grand nombre de fois dans la littérature existante. Les petites différences observées entre les formules présentes et les formules usuelles sont dues à la disponibilité des informations. Dans cette étude, les caractéristiques des commandes entrantes sont inconnues ou trop variables pour être prises en compte. Au moment où la commande est passée, peu d'informations sont connues sur le moteur à réviser. On peut connaître sa référence et ses heures de fonctionnement depuis la dernière révision. Cependant les informations importantes

telles que la séquence et le type d'opérations nécessaires à sa remise en état sont partiellement connues, voir totalement inconnues. Par conséquent, seules les caractéristiques sur les opérations rattachées aux commandes ayant quitté le centre de production sont disponibles. Nous adapterons les méthodes usuelles selon cette hypothèse.

3.2.1 Méthode constante

La méthode constante (CON) est la méthode la plus célèbre, car elle est simple à appliquer (voir Moses, 1999, Gordon *et al.*, 2002a et Lucas et Moses, 2005). De plus, c'est la méthode qui requiert le moins d'information. Cette méthode est utile lorsqu'aucune information n'est disponible. La méthode constante est décrite dans l'équation (3.1). La date d'exigibilité de la commande j , d_j , est égale à la somme de la date de réception, r_j , et du paramètre à optimiser, k_0 .

$$d_j = r_j + k_0 \quad (3.1)$$

Les paramètres à optimiser sont calculés en minimisant les critères de performance décrits dans la dernière section de ce chapitre.

3.2.2 Méthodes utilisant les données des commandes

Les sous-sections suivantes (section 3.2.2.1 et 3.2.2.2) présentent des méthodes qui utilisent des informations rattachées à la commande. Par exemple, ces commandes utilisent le temps de traitement de la commande.

3.2.2.1 Méthodes SLK et MSLK

La méthode avec tampon (*Slack*, SLK) utilise habituellement le temps de passage de la commande p_j (voir Gordon *et al.*, 2002a et Saad *et al.*, 2004). Mais cette information

n'est pas disponible au moment où la commande est formulée. Cette formule est adaptée en utilisant le temps de passage de la dernière commande ayant quitté le système de réfection, p_{i_last} (voir équation (3.2)). Le risque de cette adaptation est le décalage entre les caractéristiques de deux (2) commandes différentes. Par conséquent, une nouvelle méthode est introduite afin de tester la variabilité du système : MSLK, la méthode du tampon moyen (*Mean slack*). La moyenne des temps de passage enregistrés est utilisée (voir équation (3.3)). Les paramètres k_1 et k_2 sont les paramètres à optimiser.

$$d_i = r_j + p_{i_last} + k_1 \quad (3.2)$$

$$d_j = r_j + moy(p_i) + k_2 \quad (3.3)$$

$i < j$

3.2.2.2 Méthodes TWK et MTWK

La méthode de la charge de travail totale utilise habituellement la somme des temps d'opération effectuée sur la commande; $\sum_i p_{i,j}$ (voir Lawrence, 1995, Moses, 1999, Gordon *et al.*, 2002a, Saad *et al.*, 2004, Sha et Hsu, 2004, Sha et Liu, 2005 et Lucas et Moses, 2005). L'indice i à l'équation (3.4) est l'indice de l'opération requise. Cependant, cette information n'est pas disponible. Cette information est adaptée en utilisant la charge de travail totale de la dernière commande ayant quitté le système de réfection. Une nouvelle méthode est introduite afin de tester la variabilité du système : la charge de travail totale moyenne, MTWK. Cette méthode utilise la moyenne des charges de travail totales enregistrées (voir équation (3.5)). Les paramètres k_3 et k_4 sont les paramètres à optimiser.

$$d_j = r_j + k_3 \times \sum_i p_{i,j_last} \quad (3.4)$$

$$d_j = r_j + k_4 \times \text{moy} \left(\sum_{i < j} p_{i,j} \right) \quad (3.5)$$

D'après Gordon *et al.* (2002b), la méthode TWK est formulée différemment en utilisant une puissance de la charge de travail. Un exposant nonnégatif m est introduit (voir équation (3.6)). Le paramètre k_5 est le paramètre à optimiser.

$$d_j = r_j + k_5 \times \left(\sum_i p_{i,j_last} \right)^m \quad (3.6)$$

3.2.3 Méthodes utilisant les données du système de production

Le nombre de tâches dans les files d'attente (noté JIQ) et le nombre de tâches dans le système (noté JIS) sont deux (2) méthodes qui prennent en compte les caractéristiques du système de production (voir Lawrence, 1995, Moses, 1999, Sha et Hsu, 2004 et Lucas et Moses, 2005). Plus on emploie de caractéristiques, plus la méthode est a priori précise. Par conséquent, les méthodes JIS et JIQ sont considérées comme étant meilleures que les précédentes. Ces méthodes sont utilisées quand le système de réfection est dans un régime permanent. À l'équation (3.7), JIS_s est le nombre de tâches attendant et en cours d'exécution dans la station s . En revanche à l'équation (3.8), JIQ_s est le nombre de tâches dans la file d'attente devant la station de travail s . Le nombre de tâches dans le système est le nombre de tâches dans les files d'attente plus celles en cours de traitement. Les paramètres k_6 et k_7 sont les paramètres à optimiser.

$$d_j = r_j + \sum_i p_{i,j_last} + k_6 \times \sum_s JIS_s \quad (3.7)$$

$$d_j = r_j + \sum_i p_{i,j_last} + k_7 \times \sum_s JIQ_s \quad (3.8)$$

3.2.4 Autres méthodes usuelles

De nombreuses autres méthodes sont courantes, mais ne seront pas traitées dans le cadre de ce projet. Tout d'abord, la méthode du nombre d'opérations (notée NOP) n'est pas pertinente dans le cas présenté dans cette étude. D'après cette méthode, la date d'exigibilité est égale à la somme de la date de réception plus le nombre d'opérations multiplié par un coefficient à optimiser. Selon l'hypothèse que le réseau d'activités est fixe, le nombre d'opérations est constant quelle que soit la commande. Dans le cadre de notre étude la méthode NOP est donc équivalente à la méthode CON. Ensuite, la méthode TWKCP (*Total Work Content on Critical Path*) utilise la charge totale de travail du chemin critique. Ceci suppose connaître le chemin critique de la commande. Cela ne rentre pas dans le cadre de notre étude qui suppose inconnus les temps d'opération des commandes entrantes. En revanche, il est possible de déterminer le chemin critique probable si la probabilité d'accomplir chaque tâche est connue. Cependant, la méthode la plus efficace resterait une évaluation du temps de finition pour une probabilité fixée. Cette méthode implique de calculer le temps probable de finition de chaque chemin et de considérer le temps obtenu le plus grand. Finalement, on remarquera dans la littérature existante deux (2) définitions possibles de la méthode PPW (*Processing time plus wait*; voir équations (3.9) et (3.10)). À l'équation (3.9), Gordon *et al.* (2002a) et Gordon *et al.* (2002b) définissent la date d'exigibilité comme la somme de la date de réception, r_j , la charge de travail multipliée par un coefficient à optimiser, k_8 , et un deuxième terme à optimiser, q .

$$d_j = r_j + k_8 \times \sum_i p_{i,j_last} + q \quad (3.9)$$

Alors que pour Saad *et al.* (2004) et Chang (1996), la formule tient compte du nombre d'opérations et ne comporte qu'un seul coefficient à optimiser, k_9 (voir équation (3.10)).

$$d_j = r_j + \sum_i p_{i,j_last} + k_9 \times N_j \quad (3.10)$$

3.3 Nouvelles heuristiques

Selon une critique des formules précédentes de nouvelles méthodes sont introduites afin de tenir compte de l'évolution de l'état du système.

3.3.1 Critique des méthodes usuelles

Les heuristiques présentées dans la section 3.1 ont différentes caractéristiques. Elles prennent en compte des données qui proviennent soit de la commande soit du système de production. On peut remarquer plusieurs traits communs à toutes ces méthodes. Elles sont linéaires et les différents membres des équations sont additifs. Elles ne tiennent pas compte des évolutions des données.

3.3.2 Méthodes TIS et MTIS

La première heuristique proposée a été citée mais non formulée dans la littérature. Il s'agit du temps de traitement de la commande (voir Song *et al.*, 2002). Cette méthode est notée TIS. Comme le temps de passage de la commande entrante n'est pas connu, on emploie le temps de passage de la dernière commande à être sortie du système de réfection. À l'équation (3.11), le paramètre k_{10} est le paramètre à optimiser.

$$d_i = r_i + k_{10} \times p_{i_last} \quad (3.11)$$

De même que les méthodes précédentes, on introduit une nouvelle méthode basée sur la moyenne des temps de passage, MTIS. Cela permettra de juger si la moyenne est plus performante que la dernière valeur enregistrée qui pourra être très différente de la valeur obtenue. À l'équation (3.12), le paramètre k_{11} est le paramètre à optimiser.

$$d_i = r_i + k_{11} \times \underset{i < i}{\text{moy}}(p_i) \quad (3.12)$$

3.3.3 Nouvelles méthodes tenant compte de la variation de l'état du système

Dans toutes les formulations précédentes, la date prévue de la commande actuelle est calculée en fonction de la dernière commande sortie du système. Pour remédier à cette adaptation, il sera tenu compte de l'évolution du système entre ces deux (2) instants : l'instant où la commande actuelle arrive et le moment où est arrivée la dernière commande. Le but des méthodes tenant compte de la variation de la congestion de l'état du système est de corriger l'erreur entre la date d'exigibilité réelle et la date d'exigibilité prévue. Plusieurs méthodes sont formulées pour représenter les différentes façons de mesurer la variation de l'état du système. La variation de l'état du système est représentée par la variation des taux d'utilisation des stations de travail. En effet selon ces variables, les stratégies de mise à disposition sont adaptées pour contrôler la charge du système de réfection. Le terme correctif peut être exprimé de plusieurs manières. La variation des taux d'utilisation doit-elle être mesurée par une différence ou un quotient ? Le terme correctif doit-il être multiplicatif ou additif ? Une réponse à ces questions sera possible grâce aux classements des méthodes d'assignation des dates d'exigibilité DDA. La méthode de base qui servira à la construction des nouvelles formules est TWK, car c'est la méthode usuelle la plus utilisée (Sha et Liu, 2005).

3.3.3.1 Méthode TUD

La méthode TUD (*Total work content Times the Utilization rates Difference*) repose sur la méthode TWK très répandue dans les milieux de l'industrie et de la recherche. Cette méthode tient compte aussi de la différence des taux d'utilisation entre les moments où la commande présente et la dernière commande sortie ont été formulées (voir équations (3.13) et (3.14)). L'équation (3.13) est la formulation de TUD où la date d'exigibilité est égale à la somme de la date de réception plus la multiplication de la charge de travail de la dernière commande par le terme correctif, UD_j , et le coefficient à optimiser, k_{12} . Une équation est définie pour chaque famille de produits.

$$d_j = r_j + k_{12} \times \sum_i p_{i,j_last} \times UD_j \quad (3.13)$$

Le système de réfection étudié comporte S stations de travail. Le terme correctif, UD_j , est la différence maximale d'utilisation des S stations de travail (équation (3.14)).

$$\text{Avec } UD_j = \max_{s=1,\dots,S} (TU_{s,j} - TU_{s,j_last}) \quad (3.14)$$

À l'équation (3.14), $TU_{s,j}$ est le taux moyen d'utilisation de la station s lorsque la commande j est formulée. L'expression de la variation des taux d'utilisation est égale au maximum de ces variations, car c'est la surcharge à la machine goulot qui ralentit les flux de pièces. Ainsi, le terme correctif considère soit la plus grande augmentation des taux d'utilisation soit la plus faible diminution.

3.3.3.2 Méthode PUD

La méthode PUD (*Total work content Plus the Utilization rates Difference*) s'appuie également sur la méthode TWK. Cette méthode diffère de TUD sur plusieurs points (voir équation (3.13) et (3.15)). La variation du système, UD_j , est mesurée par la différence des taux d'utilisation. La variation du système, UD_j , est notée par la plus grande augmentation des taux d'utilisation ou la moins grande diminution des taux d'utilisation. La différence par rapport à la méthode TUD est la suivante : le terme correctif qui tient compte de l'évolution du système n'est pas multiplicatif, mais additif (voir équation (3.15)). Les paramètres k_{13} et k_{14} sont les paramètres à optimiser.

$$d_j = r_j + k_{13} \times \left(\sum_i p_{i,j_last} \right) + k_{14} \times UD_j \quad (3.15)$$

3.3.3.3 Méthode TUQ

La méthode TUQ (*Total work content Times the Utilization rates Quotient*) est un enrichissement de la méthode TWK. La variation des taux d'utilisation entre la dernière commande sortie du système et l'entrée de la commande actuelle est prise en compte. Le terme relatif à la congestion du système de réfection est exprimé par le quotient des taux d'utilisation actuels et passés (voir équation (3.17)). Selon TUQ, la date d'exigibilité est égale à la somme de la date de réception, r_j , plus la multiplication de la charge de travail de la commande passée, du terme correctif, UQ_j , et du paramètre à optimiser, k_{15} . (voir équation (3.16)). Une équation de ce type est définie pour chaque famille de produits.

$$d_j = r_j + k_{15} \times \left(\sum_t p_{t,j_last} \right) \times UQ_j \quad (3.16)$$

$$\text{Avec } UQ_j = \max_{s=1,2,3} (TU_{s,j} / TU_{s,j_last}) \quad (3.17)$$

Aux équations (3.16) et (3.17), UQ_j est la variation du système. Celle-ci est représentée par la plus grande variation des taux d'utilisation des stations de travail s . C'est la surcharge à la machine goulot qui ralentit les flux de pièces. Ainsi le terme correctif considère soit la plus grande augmentation des taux d'utilisation soit la plus faible diminution.

3.3.3.4 Méthode PUQ

La méthode PUQ (*Total work content Plus the Utilization rates Quotient*) est une variante de la méthode précédente. Elle scinde les termes de la formule de base, TWK et le terme lié à la variation de l'état du système. Cette méthode s'apparente à la méthode TUQ à une distinction près. Le terme correctif est additif ici au lieu de multiplicatif dans l'équation de TUQ (voir équation (3.18)). La date d'exigibilité, d_j , est donc évaluée

comme la somme de la date de réception, de la charge de travail de la commande passée multipliée par un coefficient à optimiser, k_{16} , et de la multiplication du terme correctif par un deuxième terme à optimiser, k_{17} .

$$d_j = r_j + k_{16} \times \left(\sum_i p_{i,j_last} \right) + k_{17} \times UQ_j \quad (3.18)$$

3.4 Détermination des coefficients

Aucune hypothèse n'est faite sur les coefficients à déterminer excepté qu'ils soient des nombres réels. Les dates d'exigibilité sont des nombres réels. La corrélation entre les différents termes des formules précédentes et la date d'exigibilité n'est pas connue. Pour cette raison, les paramètres à optimiser ne sont assujettis à aucune contrainte.

Les coefficients des méthodes précédemment décrites sont déterminés de manière à optimiser un critère de performance. Le critère de performance doit mesurer la précision et la justesse (voir Sha et Liu, 2005) des prédictions de dates d'exigibilité. La précision correspond à l'écart entre la valeur estimée et la valeur réelle. La justesse définit la variabilité entre les valeurs estimées et les valeurs réelles. La précision et la justesse sont respectivement mesurées par la déviation moyenne absolue (noté MAL) et la déviation quadratique moyenne (noté MSL). Les formules des critères de performance utilisés sont les suivantes :

- a. La déviation moyenne absolue (MAL, *Mean Absolute Lateness*) mesure la moyenne des différences absolues entre les valeurs estimées et les valeurs réelles (voir équation (3.19)). Plus MAL est faible, plus la méthode possède la capacité de prédire correctement les dates d'exigibilité. MAL est la somme des avances et des retards. Le critère de performance est la minimisation de MAL et les coefficients des dates d'exigibilité prévues sont les variables de décision.

$$MAL = \frac{1}{n} \left(\sum_{j=1}^n |d_j - c_j| \right) \quad (3.19)$$

- b. La déviation moyenne quadratique (MSL, *Mean Square lateness*) mesure la moyenne des carrés des différences entre les valeurs estimées et les valeurs réelles (voir équation (3.20)). Plus MSL est faible, plus la méthode est stable dans ses prédictions. En effet, le carré pénalise les commandes qui sont très en retard ou très en avance. En d'autres termes, la MSL pénalise les extrêmes et assure une régularité des performances. Le critère de performance est la minimisation du MSL et les coefficients des dates d'exigibilité prévues sont les variables de décision. On peut remarquer que le MSL est lié à la variance. En effet, nous estimons des dates d'exigibilité dont la variance est MSL.

$$MSL = \frac{1}{n} \left(\sum_{j=1}^n (d_j - c_j)^2 \right) \quad (3.20)$$

Au cours de cette section, plusieurs méthodes usuelles ont été adaptées au cas d'étude présent. Deux critères de performances sont définis. Ainsi, il sera possible d'observer si le choix d'un critère de performance influence le choix de la méthode d'assignation des dates d'exigibilité. Par ailleurs, afin d'améliorer les méthodes adaptées, de nouvelles méthodes ont été introduites en ajoutant des termes correctifs. Ces méthodes seront étudiées dans le cadre du système de réfection décrit au chapitre suivant.

CHAPITRE 4

LE PLAN D'EXPÉRIENCE

4.1 Généralités

La simulation est une simulation par événements discrets réalisée à l'aide du logiciel Awesim. Le modèle est construit en utilisant Awesim et le langage Visual Slam sur un ordinateur personnel AMD Athlon™ Processor (858 Mhz, 256 Mo de RAM). Le projet comporte cinq (5) simulations. Chaque simulation est constituée d'un réseau et d'un fichier de contrôle. Chaque simulation réplique une série de scénarios.

Awesim est un logiciel de simulation. On crée un projet qui peut contenir plusieurs scénarios. Chaque scénario est constitué d'un ensemble de réseaux qui décrit l'organisation du système de production et ses caractéristiques : processus, capacité, stocks, *etc.* (voir Annexe 3). Chaque scénario comprend aussi un fichier de contrôle qui définit les paramètres de simulation : caractéristiques des réplifications, collecte des statistiques et paramètres de contrôle de production (voir Annexe 4). Les algorithmes peuvent donc être directement intégrés au modèle (réseau et fichier de contrôle). On peut construire directement un plan d'expérience en définissant les caractéristiques de chaque réplification. Les statistiques peuvent être exportées dans des rapports et des fichiers extérieurs (texte, tableau Excel, *etc.*).

4.2 Description du système de réfection

Cette étude concerne une entreprise qui révisé une famille de produits. Quand les produits quittent l'usine ils sont quasiment neufs. Les caractéristiques de cette entreprise et les hypothèses employées sont les suivantes :

- a. Un centre de réfection traite deux (2) produits dont les structures sont celles vues dans le Chapitre 3 (voir Figure 14G). Les produits sont complexes. Le processus est fixe mais la durée des opérations peut varier énormément à l'intérieur même d'une station de travail.
- b. Les pièces sont spécifiques à chaque produit. On ne mélange donc pas les pièces qui à chaque réassemblage sont triées suivant la commande. Ceci assure une compatibilité lors des assemblages mécaniques.
- c. Les produits qui arrivent se distinguent en deux (2) catégories. Le premier type de produit requiert un temps de travail modéré. La deuxième catégorie de produit nécessite des temps d'opération plus longs. Ces commandes sont notées respectivement de type-1 et de type-2.
- d. Puisque les temps de traitement des deux (2) types de commandes sont significativement différents, les planifications seront découplées c'est-à-dire que les dates d'exigibilité des commandes de type-1 et de type-2 seront calculées séparément.
- e. Le rythme de la demande est le même pour les deux (2) produits. Les arrivées des commandes suivent un processus de Poisson. Ainsi, le temps interarrivée est égal à :

$$\Delta t = EXPON\left(\frac{71.95 \times TOJ}{24}\right) \quad (4.1)$$

Où TOJ est le temps d'ouverture du centre de réfection par jour exprimé en heure. $EXPON(\cdot)$ désigne la fonction de probabilité exponentielle : elle renvoie une valeur d'un échantillon distribué de façon exponentielle. Les commandes arrivent en moyenne toutes les 71.95 heures. Dans le réseau de simulation, la fermeture du centre de réfection n'est pas représentée. Par conséquent, on adapte le temps interarrivée en fonction de TOJ . Il s'agit d'un produit en croix. Pour une journée qui dure 24 heures le temps interarrivée moyen est égale à 71.95 heures. Pour une journée de TOJ heures le temps interarrivée moyen est égale à $(71.95 \times TOJ)/24$. Δt est le temps interarrivée.

- f. Toutes les commandes sont acceptées. Ceci fait partie de la politique de service de l'entreprise. Cette stratégie a pu être mise en place puisque les temps interarrivées des commandes sont connus.
- g. Le centre de réfection est organisé en atelier multigamme autour de trois (3) stations de travail (départements) indépendantes. De plus, les files d'attente devant les stations ont une capacité supposée infinie (l'espace n'est pas considéré). Le centre de réfection peut être ouvert entre 8 et 24 heures par jour ($TOJ = 8, 16$ et 24 h). Chaque station peut accueillir jusqu'à trois (3) serveurs (machines) identiques en parallèle.
- h. Au moment où la commande arrive, le système est capable de connaître instantanément l'état du système. Ceci est illusoire dans la réalité des industries. Mais la période d'échantillonnage des systèmes d'information est estimée assez courte par rapport au temps de cycle du système pour rendre cette hypothèse convenable.
- i. Les données au sujet du travail effectué sur la commande ne sont disponibles que lorsque cette dernière a quitté le centre de réfection.
- j. Une collecte des informations est faite pour connaître exactement le travail effectué par chaque poste sur chaque commande.
- k. Les priorités à chaque poste sont données par la règle FIFO (*First In First Out* : premier arrivé, premier servi). Le premier ordre de fabrication arrivé à la station de travail est traité le premier.

Initialement, l'usine compte deux (2) serveurs en parallèle dans chaque station de travail. Le centre de réfection est ouvert 8 heures par jour (un quart de travail). Différentes possibilités d'évolution sont à l'étude.

4.3 Construction du plan d'expérience

Le plan d'expérience a pour but :

- a. De savoir s'il existe des différences significatives entre les différentes méthodes d'assignation des dates d'exigibilité;
- b. De savoir si les paramètres d'entrée affectent la meilleure méthode;
- c. D'estimer la relation entre la réponse et les facteurs significatifs;
- d. De déterminer les critères de décision pour le choix des méthodes d'assignation des dates d'exigibilité.

Quels sont les facteurs étudiés ? Trois (3) variables indépendantes sont définies. Dans la littérature existante, l'interaction entre les règles de priorité, le taux d'utilisation et les méthodes d'assignation des dates d'exigibilité a été longuement étudiée et mesurée sous différents critères (Gordon *et al.*, 2002a, Sha et Liu, 2005, Watanapa et Techanitisawad, 2005 et Lucas et Moses, 2005). Les effets de la structure du produit, de l'assortiment des pièces (spécifiques et standard) et du taux de congestion ont aussi été vus. Le taux de congestion est étudié sur plusieurs niveaux en modifiant la loi des temps interarrivée des commandes. Cependant, on se penche sur la pertinence de la considération du taux de congestion. Le taux de congestion est apparenté aux taux d'utilisation des centres de travail. Les taux d'utilisation font implicitement référence à la capacité qui peut changer de deux (2) manières différentes. La capacité peut être mesurée par le produit du nombre d'heures d'ouverture par jour et du nombre de serveurs en parallèle dans chaque station. Ces deux (2) variables peuvent donc être formulées de la façon suivante. Le nombre d'heures d'ouverture peut être directement déduit du nombre de quarts de travail qui peut varier de 1 à 3 puisque chaque quart de travail dure huit heures. Le système peut être ouvert durant 8, 16 ou 24 heures. Le nombre de serveurs en parallèle peut varier de 1 à 3 dans chaque station. Initialement, la demande est satisfaite en ouvrant le système de réfection pendant 8 heures et en ayant deux (2) serveurs en parallèle dans chaque station. La capacité du scénario original est donc de 16 heures. Certains scénarios du

plan d'expérience seront rejetés, car surdimensionnés ; le système de production a une surcapacité. En effet, un scénario comportant plus de trois (3) serveurs et étant ouvert durant la journée entière a un taux d'utilisation en-dessous de 50-60 %, en raison du taux de demande spécifié. Ce niveau de surcapacité ne représente pas une réalité intéressante et n'a donc pas d'utilité. La capacité maximale est fixée à 32 heures, le double de la capacité du scénario initial. Par exemple, le scénario avec trois (3) quarts de travail et trois (3) serveurs est un scénario avec une surcapacité. La troisième variable définit la variabilité des opérations, et est noté *VAR*. Dans le plan d'expérience, *VAR* prend les valeurs 1, 5 et 10 %. L'équation (4.2) illustre la loi de distribution des temps d'opération.

$$t_{op} = NORM(\mu, \sigma^2), \text{ avec } \sigma = \mu \times VAR/100 \quad (4.2)$$

Les temps d'opération (notés t_{op}) sont exprimés par des lois normales (notées *NORM*) dont l'écart-type est une multiplication de la moyenne des temps d'opération en heures d'après les données historiques disponibles, μ , par la variabilité en pourcentage de cette moyenne, *VAR*.

Le modèle est supposé linéaire. Par conséquent, aucune transformation n'est appliquée sur les variables indépendantes. Nous définissons toutes les variables sur trois (3) niveaux en considérant la contrainte d'une capacité maximum de 32 heures. Le Tableau IV présente les facteurs indépendants du plan d'expérience.

Tableau IV

Description des facteurs indépendants du plan d'expérience

| Facteur | Description | Niveau bas | Niveau moyen | Niveau haut |
|----------------|-----------------------------------|-------------------|---------------------|--------------------|
| NSS | Nombre de serveurs par station | 1 | 2 | 3 |
| TOJ (h) | Temps d'ouverture du système | 8 | 16 | 24 |
| VAR (%) | Variabilité des temps d'opération | 1 | 5 | 10 |

On obtient quinze scénarios. Pour chaque scénario, on mesurera la performance des méthodes d'assignation des dates d'exigibilité décrites dans le Chapitre 4. Les quinze scénarios sont effectués à chacune des cinq (5) répliques pour assurer un nombre suffisants de résultats mais aussi un temps de simulation raisonnable. L'analyse des données traitera donc 75 répliques. La simulation de ces 75 répliques prendra plus d'une heure.

La génération, le traitement et l'analyse des données du plan d'expérience sont des étapes bien distinctes. Les étapes de la méthodologie mise en place sont décrites à la Figure 15.

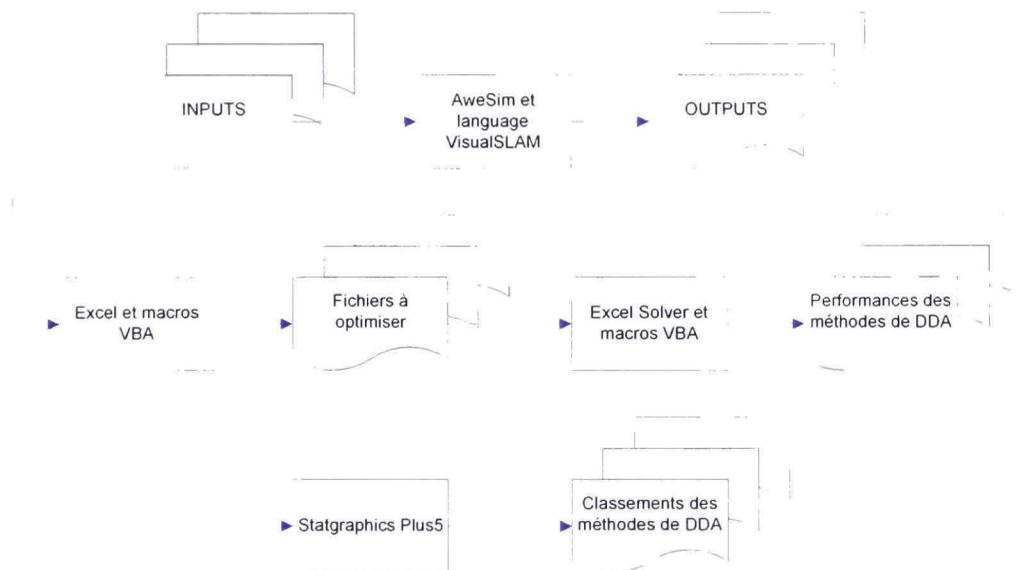


Figure 15 Méthodologie déployée pour comparer les méthodes de DDA dans le système de réfection

La première étape est la création des données. Les différents scénarios étudiés sont décrits dans des fichiers textes. Un fichier texte correspond à une simulation. Chaque fichier texte indique une série de combinaisons de numéro de fichier, de temps d'ouverture par jour (TOJ), de nombre de serveurs (NNS), de variabilité des temps

d'opération (VAR) (voir Tableau V). Ces fichiers sont lus par le logiciel Awesim qui simule alors les différents scénarios.

Tableau V

Cinquième fichier INPUT pour le modèle de simulation: « DOE5.txt »

| Numéro de la réplique | Temps d'ouverture par jour (h) (<i>TOJ</i>) | Nombre de serveurs par station (<i>NSS</i>) | Variabilité des temps d'opération (<i>VAR</i>) |
|-----------------------|---|---|--|
| 5 | 8 | 2 | 0.01 |
| 5 | 8 | 2 | 0.05 |
| 5 | 8 | 2 | 0.1 |
| 5 | 8 | 3 | 0.01 |
| 5 | 8 | 3 | 0.05 |
| 5 | 8 | 3 | 0.1 |
| 5 | 16 | 1 | 0.01 |
| 5 | 16 | 1 | 0.05 |
| 5 | 16 | 1 | 0.1 |
| 5 | 16 | 2 | 0.01 |
| 5 | 16 | 2 | 0.05 |
| 5 | 16 | 2 | 0.1 |
| 5 | 24 | 1 | 0.01 |
| 5 | 24 | 1 | 0.05 |
| 5 | 24 | 1 | 0.1 |

Les données de ces scénarios sont alors retranscrites dans des classeurs Microsoft Excel. Ces données indiquent toutes les informations potentiellement utiles. Comme il est indiqué sur le réseau en Annexe 3, les OUTPUTS sont partagés en 14 fichiers. Les temps d'opération à enregistrer sur chaque station de travail sont si nombreux qu'ils sont partagés sur quatre (4) fichiers. Pour les trois (3) stations de travail, il en résulte 12 fichiers qui indiquent le numéro de réplique, le temps d'arrivée de la commande et le temps d'opération effectué. Un fichier OUTPUT est créé à la sortie des commandes. Ce fichier Excel regroupe le numéro de réplique, le temps d'arrivée des commandes, le

type de commande, le temps de passage dans le système et la date de sortie de la commande.

Une création d'un OUTPUT a lieu à l'entrée du réseau, il rapporte :

- a. Le numéro de réplique ;
- b. Le temps d'arrivée de la commande ;
- c. Le nombre de pièces en cours de traitement à chaque station de travail ;
- d. Le nombre de postes occupés à chaque station de travail ;
- e. La longueur de la file d'attente devant chaque station de travail ;
- f. Le taux moyen d'utilisation de chaque station de travail ;
- g. La longueur moyenne des files d'attente devant chaque station de travail ;
- h. Le temps moyen d'attente dans les files d'attente devant chaque station de travail.

L'étape suivante est le traitement des données. Certaines données ne sont pas directement disponibles. C'est le cas de la charge de travail. Après plusieurs opérations dans les différents classeurs Microsoft Excel, on obtient les charges de travail pour toutes les commandes traitées. Plus exactement, la charge de travail est la somme des temps d'opérations effectuées sur la commande. Cette somme est calculée grâce à un tableau dynamique qui regroupe les commandes selon leur temps d'arrivée dans le réseau. Les informations utiles sont alors réorganisées dans les classeurs Microsoft Excel à optimiser. Chaque feuille d'un classeur correspond en fait à la planification des dates d'exigibilité selon une certaine méthode sous un certain critère de performance.

La troisième étape correspond à l'obtention des performances de chaque méthode d'assignation des dates d'exigibilité (DDA) sous chaque critère. Ce sont ces données qui permettent de comparer les méthodes les unes entre les autres. Ces performances sont obtenues en employant le Solveur de Microsoft Excel et d'une macro VBA qui répète l'optimisation pour chaque feuille de chaque classeur (voir Annexe 5). L'exécution de cette macro prend plusieurs heures.

Finalement, ces données sont analysées par Statgraphics® Plus5. Ceci nous permet donc de classer les méthodes et d'en tirer différents enseignements. Les détails de cette analyse sont présentés aux sections 3.5 et 3.6. Les résultats dévoilés dans le chapitre 4 permettront de caractériser les méthodes de DDA.

4.4 Modélisation

4.4.1 Régime transitoire

La période de régime transitoire a été déterminée et la période de transition n'a pas été prise en compte lors du calcul des critères de performance. Le régime permanent a été atteint après neuf (9) mois de régime transitoire. Ces neuf (9) premiers mois sont rejetés en tant que période de régime transitoire. Les données sont collectées sur les deux (2) années de production suivant ces neuf (9) premiers mois. Les valeurs des coefficients des méthodes d'assignation des dates d'exigibilité sont donc estimées sur les données collectées au bout de deux (2) ans de régime permanent. Cette période est suffisante, car les objectifs sont alors mesurés sur plus d'une centaine de commandes (voir le modèle de simulation dans les ANNEXE 1 et ANNEXE 2).

4.4.2 Nombres sources

Les nombres sources (*random seed*⁴) sont différents pour chaque activité. Ainsi, même si deux (2) activités ont la même distribution de temps d'opération, elles seront indépendantes et ne dureront pas le même temps. De plus, la spécification des nombres sources assure que les répliques sont reproductibles.

⁴ Le nombre source est la valeur de départ qui initialise le générateur de nombres pseudo-aléatoires. Il est le même tout au long de la simulation (du début du régime transitoire jusqu'au régime permanent) puisque le générateur n'est pas réinitialisé en cours de simulation.

Des nombres sources communs sont utilisés pour assurer que les différences observées parmi les performances des méthodes de DDA sont le résultat de différentes politiques et non de variations aléatoires. Chaque niveau du plan d'expérience, c'est-à-dire chaque combinaison de temps d'ouverture par jour, de nombre de serveurs par station et de variabilité, comporte les cinq (5) réplifications décrites précédemment. Les réplifications au travers d'un niveau à l'autre utilisent les mêmes nombres sources. Les réplifications à l'intérieur d'un même niveau utilisent des nombres sources indépendants.

4.4.3 Traitement des données

Les mesures enregistrées dans les différentes feuilles Excel sont triées puis regroupées. Toutes les informations d'une réplification sont ensuite contenues dans une seule et même feuille. Il n'y a donc plus que cinq (5) feuilles Excel, une par réplification. Ensuite, chaque scénario et chaque critère de performance est traité séparément. Pour chaque méthode, les données nécessaires sont extraites. Après, le solveur inclus dans Excel est utilisé pour obtenir les valeurs optimales des coefficients k_j . La Figure 16 illustre ce processus.

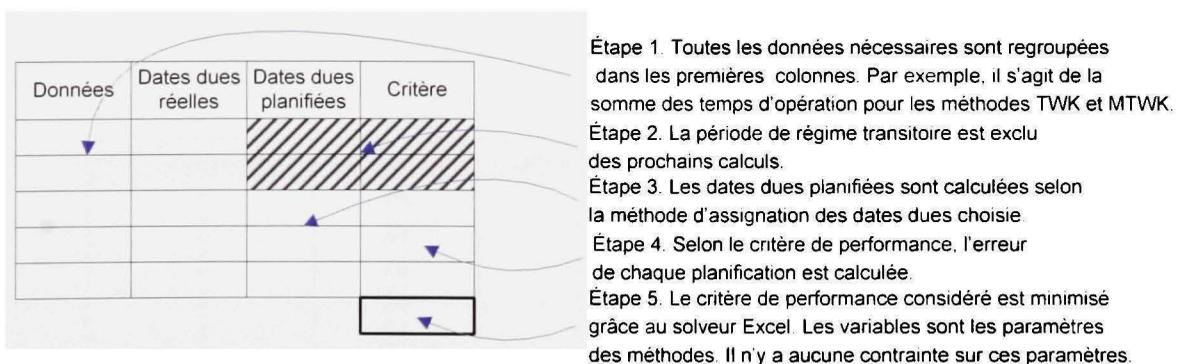


Figure 16 Étapes du calcul des performances des méthodes de DDA

Finalement, les valeurs des critères de performance sont exportées vers Statgraphics® Plus5.

4.5 Étude préliminaire : justification des paramètres indépendants

Avant de passer à l'analyse des résultats, cette étude préliminaire vise à démontrer l'utilité de considérer le nombre de serveurs en parallèle dans chaque station et le temps d'ouverture du système de réfection au lieu d'une capacité de production du système. On définit dans cette étude la capacité comme le temps effectivement disponible au cours d'une journée. Ainsi la capacité est égale au produit du nombre de serveurs en parallèle et du temps d'ouverture par jour.

Le Tableau VI présente les paires de scénarios à comparer qui sont notés *No. Comparaison*. Le but est de savoir si des scénarios de capacités équivalentes mais d'organisation différente (i.e. paramètres NSS et TOJ différents) peuvent avoir des taux d'utilisation équivalents. Dans l'affirmative, il serait justifié d'étudier les systèmes de réfection non en fonction de leur organisation mais en fonction de leur capacité.

Tableau VI

Groupes à comparer sur leurs taux de congestion

| No. Comparaison | Capacité (h) | Variabilité (%) | Groupe 1 | | Groupe 2 | |
|-----------------|--------------|-----------------|----------|-------|----------|-----|
| | | | TOJ*(h) | NSS** | TOJ (h) | NSS |
| 1 | 16 | 1 | 8 | 2 | 16 | 1 |
| 2 | 16 | 5 | 8 | 2 | 16 | 1 |
| 3 | 16 | 10 | 8 | 2 | 16 | 1 |
| 4 | 24 | 1 | 8 | 3 | 24 | 1 |
| 5 | 24 | 5 | 8 | 3 | 24 | 1 |
| 6 | 24 | 10 | 8 | 3 | 24 | 1 |

*: Temps d'Ouverture par Jour exprimé en heures

** : Nombre de Serveurs par Station

Les tests statistiques déployés seront basés sur les taux d'utilisation des stations de travail. Cependant, les taux d'utilisation fournis par Awesim ne sont pas utilisables tels

quels. Une transformation est nécessaire. En effet, les taux d'utilisation indiqués par Awesim sont cumulatifs et ne sont pas rapportés au nombre de machines. Notons TU_s le taux indiqué par Awesim dans ces rapports de simulation. TU_s est calculé selon la formule de l'équation (4.3). TU_s est le quotient de la somme des temps de travail à la station s , tps_trav_m , par le temps de simulation, $tps_simulation$.

$$TU_s = \frac{\sum_{m=1}^{NSS} tps_trav_m}{tps_simulation} \quad (4.3)$$

Prenons un exemple fictif : sur trois (3) machines le rapport indique un taux égal à 2.96. En d'autres termes, 2.96 machines sont utilisées en moyenne soit un taux d'utilisation moyen égal à 98.6 % (= 2.96/3). C'est ce taux d'utilisation moyen qui sera comparé car il ne tient pas compte du nombre de machines. Ce taux, noté TX_s , est formulé dans l'équation (4.4). Il est égal au quotient de TU_s par le nombre de serveur à la station s , NSS .

$$TX_s = \frac{TU_s}{NSS} = \frac{1}{NSS} \times \frac{\sum_{m=1}^{NSS} tps_trav_m}{tps_simulation} \quad (4.4)$$

4.5.1 Méthodologie de justification

Il s'agit de comparer deux (2) échantillons dont les données sont les taux d'utilisation obtenus précédemment grâce à l'équation (4.4). Deux (2) types de test sont disponibles : paramétriques ou non-paramétriques. Le test paramétrique considéré est le test t de Student. Avant d'appliquer ce test, précisons ses conditions d'application :

- a. Les observations constituent des échantillons prélevés au hasard et indépendamment ;
- b. Les populations échantillonnées sont distribuées normalement ;
- c. Les variances des populations sont identiques.

La première hypothèse est vérifiée, car les conditions d'obtention des données (conditions de simulation) entre les deux (2) échantillons sont indépendantes et différentes. Les deux (2) autres hypothèses seront vérifiées respectivement dans les sections 4.5.2 et 4.5.3.

La Figure 17 illustre la manière de procéder pour le choix d'un test de comparaison statistique. Cette procédure vise à déterminer un cadre de comparaison commun et adéquat pour toutes les comparaisons. De plus, dès qu'une seule des trois (3) conditions d'application du test t de Student n'est pas valide pour l'une des paires d'échantillons, il faut employer le test de W de Mann-Whitney. Ce dernier test est un test non-paramétrique sur les médianes. L'homoscédasticité est l'homogénéité de la dispersion des résidus. Dans notre cas, l'homoscédasticité correspond donc à l'homogénéité des variances entre les groupes. Le test de Mann-Whitney est décrit à l'Annexe 6. Les paires d'échantillon à comparer sont notés *No. Comparaison* (voir Tableau VI).

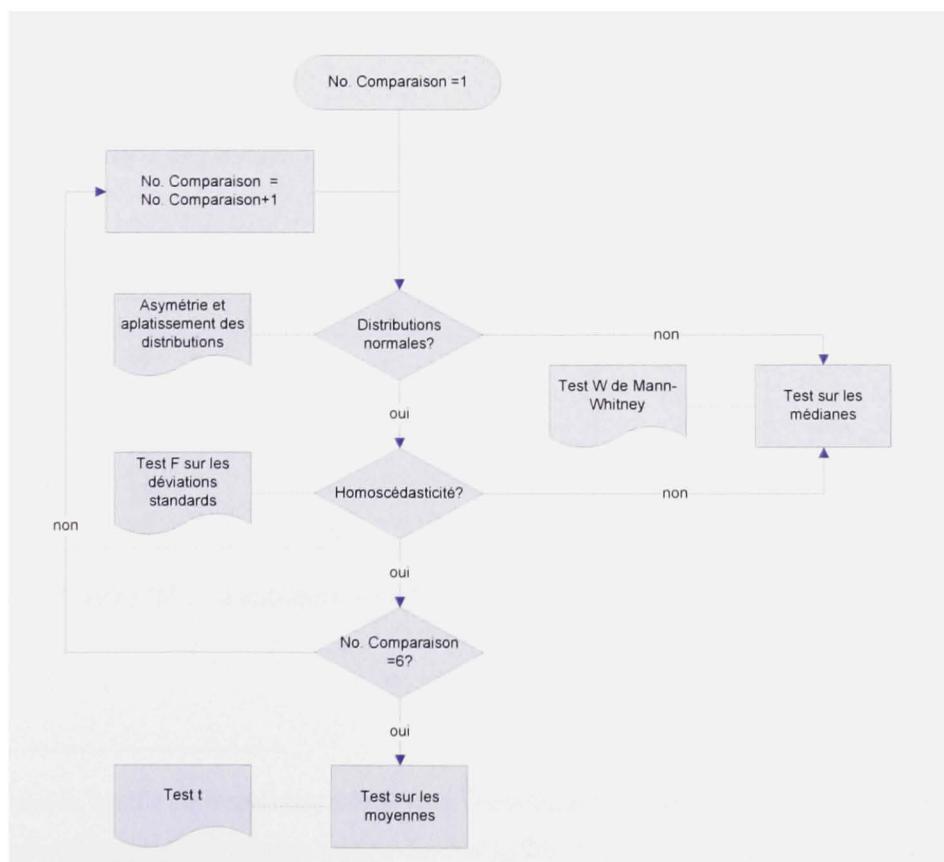


Figure 17 Démarche pour déterminer le test de comparaison adéquat

Les quatre (4) tests compris dans cette procédure sont décrits dans les sections suivantes.

4.5.2 Distribution normale des échantillons

La normalité des distributions peut se mesurer de deux (2) façons différentes. La première méthode est graphique et consiste à tracer graphiquement les *normits*⁵ (de l'Anglais : *Normal unit*) en fonction des extrema des segments d'échantillons. Il s'agit du graphe *normal plot* aussi appelé droite de Henry. La deuxième consiste à calculer l'asymétrie et l'aplatissement standardisés (voir Tableau VII). Ces valeurs doivent être comprises dans l'intervalle $[-2 ; 2]$ (voir Baillargeon (2002) pour les détails sur cet intervalle). Des valeurs à l'extérieur de cet intervalle impliquent que l'échantillon n'est pas distribué normalement.

Tableau VII

Test des valeurs d'asymétrie et d'aplatissement sur les taux d'utilisation des stations

| Capacité (h) | Variabilité (%) | Station | | |
|--------------|-----------------|---------|---|---|
| | | 1 | 2 | 3 |
| 16 | 1 | y* | y | y |
| 16 | 5 | y | y | y |
| 16 | 10 | y | y | y |
| 24 | 1 | y | y | y |
| 24 | 5 | y | y | y |
| 24 | 10 | y | y | y |

*: (y/n) "n" si la distribution est normale, "y" sinon

⁵ Le *normit* est le fractile correspondant à la fréquence cumulée considérée selon la probabilité cumulée de la loi Normale standard. Ainsi, sur une courbe de distribution de la loi Normale standard, si la probabilité cumulée est en ordonnée alors le *normit* est en abscisse.

Les valeurs d'asymétrie et d'aplatissement standardisés sont directement disponibles dans le sommaire des analyses statistiques de Statgraphics® Plus5. Il est à noter que la vérification graphique de la normalité est difficile pour des échantillons ayant un faible effectif (moins de 30 valeurs). Ici, l'effectif est très faible, car il n'y a que cinq essais par population. La méthode basée sur l'asymétrie et l'aplatissement standardisés sera donc employée.

4.5.3 Variances égales, test F de Fisher

L'hypothèse d'homoscédasticité se vérifie graphiquement. Le graphe des résidus en fonction des observations doit être contenu dans une bande horizontale. Des points qui se trouveraient à l'extérieur de cette bande à une distance de plus de trois (3) fois l'écart type indiquent des points aberrants. Les points aberrants sont à étudier de près, car leur influence sur les résultats peut être importante. L'homoscédasticité peut aussi être vérifiée par le test F sur les écart-types. Celui-ci est disponible dans la fenêtre de comparaison des déviations de Statgraphics® Plus5.

Avant de présenter les résultats (Tableau VIII), voici la procédure du test F de Fisher. Il s'applique dans le cas d'échantillons prélevés au hasard et indépendamment de populations normales de variances inconnues. Les hypothèses nulle et alternative sont :

$$H_0 : \sigma_1 = \sigma_2 \quad (4.5)$$

$$H_1 : \sigma_1 \neq \sigma_2 \quad (4.6)$$

$$F = \frac{S_1^2}{S_2^2} \quad (4.7)$$

La statistique F de Fisher est distribuée selon la loi de Fisher avec n_1-1 et n_2-1 degrés de liberté. La règle de décision est de rejeter l'hypothèse nulle H_0 si $F > F_{\alpha/2; n_1-1, n_2-1}$ ou $F < F_{1-\alpha/2; n_1-1, n_2-1}$.

Tableau VIII

Test d'homoscédasticité sur les taux d'utilisation des stations

| Capacité (h) | Variabilité (%) | Station | | |
|--------------|-----------------|---------|---|---|
| | | 1 | 2 | 3 |
| 16 | 1 | y* | y | y |
| 16 | 5 | y | y | y |
| 16 | 10 | y | y | y |
| 24 | 1 | y | y | y |
| 24 | 5 | y | y | y |
| 24 | 10 | y | y | y |

*: (y n) "n" s'il n'y a pas de différence significative "y" sinon

Les hypothèses d'indépendance, de normalité et d'homoscédasticité ont été vérifiées pour toutes les paires de populations à comparer. Ainsi, le test paramétrique, t de Student, est appliqué. Le test non-paramétrique de Mann-Whitney, malgré qu'il ne soit pas utilisé, est décrit à l'Annexe 6 dans le but compléter la description de la méthodologie.

4.5.4 Test paramétrique, t de Student

Le test t de Student est utilisé pour comparer deux (2) moyennes. La taille de l'un des échantillons est inférieure à 30. Ce sont des échantillons prélevés au hasard et indépendamment de populations normales de variances inconnues, mais supposées égales à une valeur commune. On applique donc le test t de Student. Les hypothèses nulle H_0 et alternative H_1 sont décrites respectivement par les équations (4.8) et (4.9) :

$$H_0 : \mu_1 = \mu_2 \quad (4.8)$$

$$H_1 : \mu_1 \neq \mu_2 \quad (4.9)$$

L'écart réduit t exprime la différence entre les moyennes de deux (2) groupes pondéré par la taille de chacun des groupes (n_1 et n_2) ainsi que l'écart-type à l'intérieur de chaque groupe (voir équation (4.10)).

$$t = \frac{\bar{x}_1 - \bar{x}_2}{\sqrt{\frac{\sum (x_{r1} - \bar{x}_1)^2 + \sum (x_{r2} - \bar{x}_2)^2}{n_1 + n_2 - 2}} \sqrt{\frac{1}{n_1} + \frac{1}{n_2}}} \quad (4.10)$$

L'écart réduit t est distribué selon la loi de Student avec $n_1 + n_2 - 2$ degrés de liberté. La règle de décision est de rejeter l'hypothèse nulle H_0 si $t > t_{\alpha/2, n_1 + n_2 - 2}$ ou $t < -t_{\alpha/2, n_1 + n_2 - 2}$. À la vue des résultats des sections précédentes, le test t de Student est le test choisi pour comparer les paires d'échantillons. Les résultats sont présentés au Tableau IX.

Tableau IX

Résultats des tests t sur les taux d'utilisation des stations

| Capacité (h) | Variabilité (%) | Station | | |
|--------------|-----------------|---------|---|---|
| | | 1 | 2 | 3 |
| 16 | 1 | n* | y | n |
| 16 | 5 | n | y | n |
| 16 | 10 | n | y | n |
| 24 | 1 | n | y | n |
| 24 | 5 | n | y | n |
| 24 | 10 | n | y | n |

*: (y/n) "n" s'il n'y a pas de différence significative "y" sinon

D'après le Tableau IX, le test t de Student met en évidence que le taux d'utilisation est équivalent dans toutes les comparaisons exceptées pour la deuxième station qui dans chaque cas a un taux d'utilisation significativement différent avec un intervalle de confiance de 95 %.

4.5.5 Interprétation des résultats

Selon les résultats (voir Tableau IX), les six (6) comparaisons aboutissent toutes à la conclusion d'un taux d'utilisation identique pour les stations 1 et 3 mais différent pour la station 2. On déduit que la capacité définie comme le produit du nombre de serveurs en parallèle et du temps d'ouverture par jour n'est pas un bon paramètre pour définir les scénarios. Cette section montre donc qu'il est légitime et justifié d'étudier les scénarios en fonction des paramètres de temps d'ouverture, de nombre de serveurs et de variabilité. Des combinaisons différentes de ces paramètres aboutissent à des scénarios de capacité équivalente mais surtout à des taux d'utilisation différents. Étudier les scénarios selon leur capacité réduit la perception et la caractérisation des systèmes de production. Par la suite, chaque scénario sera défini en fonction de son temps d'ouverture par jour, du nombre de serveurs par station et de sa variabilité. Pour chaque scénario, un classement des méthodes d'assignation des dates d'exigibilité sera déterminé. Ensuite, les effets des paramètres indépendants seront déterminés sur les méthodes retenues.

4.6 Méthodologie d'analyse des résultats de la modélisation

L'étude préliminaire étant finie, la méthodologie de l'analyse des résultats est mise en place. La démarche de l'analyse des résultats est décrite à la Figure 18. Cette démarche est similaire à celle de l'étude préliminaire. L'étude préliminaire étudiait les taux d'utilisation, maintenant les échantillons considérés sont composés des performances MAL et MSL des méthodes de DDA.

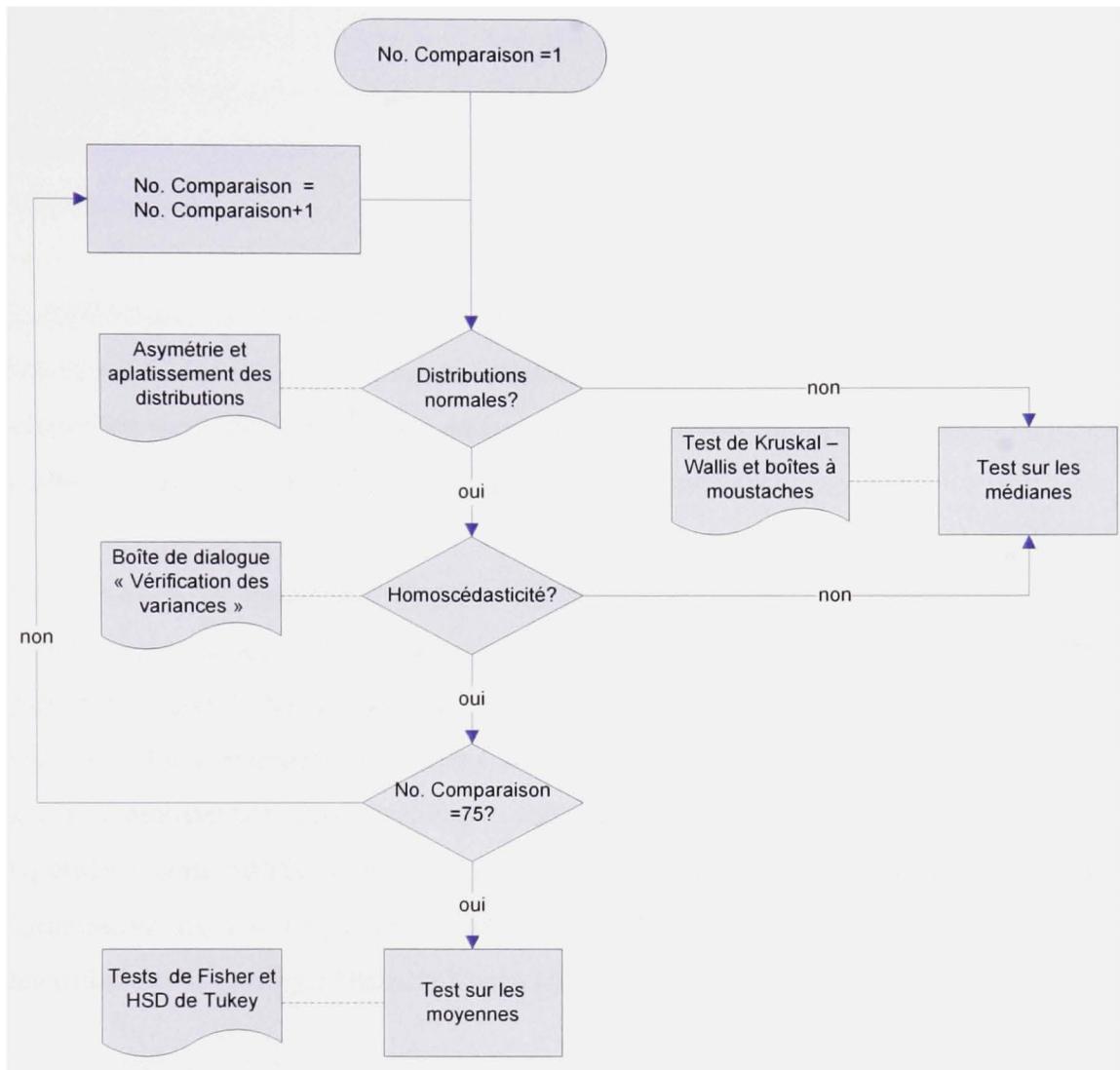


Figure 18 Démarche de comparaison statistique des performances des méthodes d'assignation des dates d'exigibilité

Tout d'abord, on procède à la vérification des hypothèses avant d'appliquer une analyse de la variance. Les hypothèses à vérifier sont les mêmes que précédemment. Nous devons vérifier l'hypothèse de l'indépendance des échantillons, de la distribution normale et des variances égales. Les échantillons sont indépendants car issus de scénarios indépendants. Il reste à vérifier les deux (2) dernières hypothèses. Pour l'hypothèse de variances égales, la boîte de dialogue de Statgraphics® Plus5 *Variance Check* (vérification de variance) permet de conclure avec un niveau de confiance de

95 % si oui ou non les variances ne sont pas significativement différentes. La boîte de dialogue de Statgraphics® Plus5 *Variance Check* comprend plusieurs méthodes dont certaines sont inadéquates pour des données qui ne sont pas distribuées normalement (voir Annexe 6).

La distribution normale des populations des échantillons sera analysée selon la méthode discutée à la section 4.5.2. Plus exactement, l'asymétrie et l'aplatissement de chaque échantillon sont calculés. Si l'une de ces valeurs n'est pas dans l'intervalle $[-2 ; 2]$, alors la distribution de la population sera considérée non normale.

Par ailleurs, si au moins une des trois (3) hypothèses n'est pas vérifiée pour l'une des comparaisons, le test de comparaison des méthodes de DDA sera non-paramétrique. Dans cette étude, le test de Kruskal–Wallis (voir Annexe 6) est le test non-paramétrique considéré. Le classement des méthodes est alors effectué par lecture graphique des boîtes à moustaches avec encoches (voir Annexe 6). Dans le cas où les trois (3) hypothèses sont vérifiées pour toutes les comparaisons, l'existence d'une différence significative sur les moyennes est révélée par le test de Fisher et le classement est déterminé par la méthode HSD de Tukey (Baillargeon, 2002).

4.7 Résultats des tests d'hypothèse

Cette section rapporte les résultats des tests d'hypothèses de normalité et d'homoscédasticité. Selon les résultats de ces tests, le test de comparaison et de classement des méthodes de DDA sera déterminé. Le Tableau X regroupe les résultats des tests de normalité sur les différents scénarios. Il apparaît que plusieurs échantillons ne sont pas prélevés de population de distribution normale. Par conséquent, le test de comparaison sera le test non-paramétrique de Kruskal-Wallis. Les méthodes de DDA sont classées en analysant le graphique des boîtes à moustaches avec encoches.

Tableau X

Résultats du test de la normalité des populations des échantillons

| Type de commande | 1 | | 2 | |
|--|------------------|------------------|-----|-----|
| | MAL ¹ | MSL ² | MAL | MSL |
| Scénario (TOJ, NSS, VAR) ³ | | | | |
| (8, 2, 1) | n ⁴ | y | n | n |
| (8, 2, 5) | n | n | n | n |
| (8, 2, 10) | n | n | n | n |
| (8, 3, 1) | n | y | y | y |
| (8, 3, 5) | y | y | y | y |
| (8, 3, 10) | y | y | y | y |
| (16, 1, 1) | n | y | n | n |
| (16, 1, 5) | n | n | n | n |
| (16, 1, 10) | n | n | n | n |
| (16, 2, 1) | y | y | y | y |
| (16, 2, 5) | y | y | y | y |
| (16, 2, 10) | y | y | y | y |
| (24, 1, 1) | y | y | y | y |
| (24, 1, 5) | y | y | y | y |
| (24, 1, 10) | y | y | y | y |

¹ : Écart absolu moyen (*Mean absolute lateness*)

² : Écart moyen quadratique (*Mean square lateness*)

³ : TOJ; Temps d'ouverture par jour (heure), NSS; Nombre de serveurs par station et VAR ; variabilité des temps d'opération (%)

⁴ : "y" si la population a une distribution normale, sinon "n"

Puisque la première hypothèse, l'hypothèse de distribution normale, n'est pas vérifiée les tests d'homoscédasticité ne sont pas nécessaires. Dès que l'une des deux (2) hypothèses n'est pas vérifiée, le test de comparaison des échantillons est un test non-paramétrique.

4.8 Classement des méthodes d'assignation des dates d'exigibilité

Deux (2) méthodes sont possiblement utilisées au cours de la procédure afin de déterminer le classement des méthodes d'assignation des dates d'exigibilité. Ces méthodes sont : la méthode HSD de Tukey et la méthode graphique des boîtes à moustaches avec encoche. La méthode HSD est appliquée lorsque les hypothèses d'indépendance, de normalité et d'homoscédasticité ont été vérifiées. À la vue des résultats précédents, la méthode des boîtes à moustaches avec encoche sera appliquée. Malgré cela, la méthode Tukey sera décrite, car elle fait partie de la méthodologie mise en place. Les deux méthodes sont décrites à l'Annexe 6.

CHAPITRE 5

COMPORTEMENTS DES MÉTHODES

Les classements des méthodes sont donnés par scénario, type de commande et critère de performance. Les méthodes sont triées de la meilleure à la pire. Les méthodes réunies sous un même trait forment un *groupe homogène*. Leurs performances ne sont pas significativement différentes. Les tendances sont mises en évidence par les comparaisons de paires ou de triplets de scénarios. Ainsi les tendances suite à la variation du temps d'ouverture par jour (noté TOJ) sont analysées par la comparaison de scénarios ayant des TOJ différents, mais un nombre de serveurs par station (NSS) et une variabilité des temps d'opération (VAR) identiques. Ces tendances sont observables lorsque TOJ passe de 8 h à 16 h et de 16 h à 24 h. Les tendances suite à la variation de NSS sont également mises en relief lorsque NSS passe de 1 à 2 et de 2 à 3. Enfin, les tendances suite à la variation de VAR sont mises en valeur lorsque VAR passe de 1 % à 10 % en passant par 5 %. L'évolution de leur performance (retard moyen absolu ou retard moyen quadratique) est analysée en fonction de l'évolution de leur rang dans le classement des méthodes. Par exemple, il est dit que la performance d'une méthode augmente si le rang de la méthode au classement augmente. Inversement, sa performance diminue si son rang diminue. Un scénario peut être désigné par le triplet (TOJ, NSS, VAR). Par exemple, le scénario (8, 2, 1) est la situation où les ateliers sont ouverts 8 heures par jour avec deux (2) serveurs en parallèle à chaque station et où la variabilité des temps d'opération est égale à 1 %.

5.1 Commande de type 1 sous le critère de performance MAL

Le Tableau XI présente les classements des méthodes à chaque scénario pour les commandes de type-1 sous le critère de performance MAL. Les classements sont

désignés du rang 1 au rang 13 ; de la meilleure méthode à la pire méthode. Chaque groupe homogène est signalé par un trait qui souligne les méthodes concernées. De manière générale, TUD est une des moins bonnes méthodes puisque sur 15 scénarios, elle se classe dernière 11 fois. Sur les quatre (4) autres scénarios, TUD n'exécède pas le quatrième rang. La première place est largement partagée entre JIS et TUQ. Pour le scénario (8, 3, 5), PUD est exceptionnellement la meilleure méthode. Lors des scénarios dont le temps d'ouverture par jour est de 24h (trois quarts de travail), les méthodes de DDA ne présentent aucune différence significative selon le test de Kruskal-Wallis. Ces résultats seront confrontés aux autres résultats des sections 5.2, 5.3 et 5.4.

5.2 Commande de type 2 sous le critère de performance MAL

Concernant les commandes de type 2 sous le critère MAL, les cinq (5) meilleures méthodes sont : JIS, JIQ, CON, PUQ, et PUD. TUD est la moins bonne méthode en étant classée dernière 14 fois sur 15. Ces résultats sont consignés dans le Tableau XII.

5.3 Commande de type 1 sous le critère de performance MSL

Pour les commandes de type 1 sous le critère MSL, les deux (2) meilleures méthodes sont JIS et PUD qui se partagent 12 des 15 premières places (voir Tableau XIII). PUQ est la méthode qui occupe les trois (3) dernières premières places restantes. TUD est la moins efficace en étant 13 fois au dernier rang du classement.

5.4 Commande de type 2 sous le critère de performance MSL

Concernant les commandes de type 2 sous le critère MSL, les trois (3) meilleures méthodes sont PUD, JIS et PUQ. TUD est la moins efficace puisqu'elle occupe toujours la dernière place exceptée une (1) fois. Le Tableau XIV présente l'ensemble des classements des méthodes.

Tableau XI

Classement des méthodes de DDA pour les commandes de type 1 sous l'objectif MAL

| (TOJ, NSS, VAR) | Rang* | | | | | | | | | | | | |
|-----------------|-------|-----|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|-----|
| | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 | 10 | 11 | 12 | 13 |
| (8,2,1) | JIS | JIQ | TIS | SLK | PUQ | TUQ | MTIS | PUD | CON | TWK | MTWK | MSLK | TUD |
| (8,2,5) | JIS | JIQ | TIS | SLK | TUQ | PUQ | MTIS | PUD | CON | TWK | MTWK | MSLK | TUD |
| (8,2,10) | JIS | JIQ | TIS | SLK | PUD | TUQ | CON | PUQ | TWK | MTWK | MSLK | MTIS | TUD |
| (8,3,1) | TUQ | PUD | PUQ | TWK | MTWK | CON | MTIS | MSLK | TIS | SLK | JIS | JIQ | TUD |
| (8,3,5) | PUD | TUQ | PUQ | MTWK | CON | TWK | MTIS | MSLK | TIS | SLK | JIS | JIQ | TUD |
| (8,3,10) | TUQ | PUD | PUQ | MTWK | CON | TWK | MTIS | MSLK | TIS | SLK | JIS | JIQ | TUD |
| (16,1,1) | JIS | JIQ | SLK | TIS | MTIS | MSLK | PUD | TUQ | PUQ | MTWK | CON | TWK | TUD |
| (16,1,5) | JIS | JIQ | SLK | TIS | MSLK | MTIS | PUD | TUQ | PUQ | CON | TWK | MTWK | TUD |
| (16,1,10) | JIS | JIQ | SLK | TIS | MTIS | MSLK | PUQ | PUD | TUQ | TWK | CON | MTWK | TUD |
| (16,2,1) | TUQ | PUD | PUQ | MTWK | CON | TWK | MTIS | MSLK | TIS | SLK | JIS | TUD | JIQ |
| (16,2,5) | TUQ | PUD | PUQ | MTWK | CON | TWK | MTIS | MSLK | TIS | SLK | JIS | JIQ | TUD |
| (16,2,10) | TUQ | PUQ | MTWK | PUD | TWK | MTIS | MSLK | CON | TIS | SLK | JIS | JIQ | TUD |
| (24,1,1) | TUQ | PUD | PUQ | TUD | TWK | MTWK | CON | MTIS | MSLK | JIS | SLK | TIS | JIQ |
| (24,1,5) | TUQ | PUD | PUQ | TUD | MTWK | TWK | CON | MTIS | MSLK | JIS | SLK | TIS | JIQ |
| (24,1,10) | TUQ | PUQ | PUD | TUD | MTWK | CON | TWK | MTIS | MSLK | JIS | SLK | TIS | JIQ |

Notation:JIS méthode *Job In System*JIQ méthode *Job In Queue*SLK méthode *Slack*PUQ méthode *Total work content Plus Utilization rates quotient*TUQ méthode *Total work content Times Utilization rates quotient*MTIS méthode *Mean Time In System*TIS méthode *Time In System*

* :

PUD méthode *Total work content Plus Utilization rates difference*CON méthode *Constant*TWK méthode *Total Work Content*MTWK méthode *Mean Total Work Content*MSLK méthode *Mean Slack*TUD méthode *Total work content Times Utilization rates difference*

Les méthodes de DDA sont classées de la meilleure à la pire, du rang 1 au rang 13.

Tableau XII

Classement des méthodes de DDA pour les commandes de type 2 sous l'objectif MAL

| (TOJ, NSS, VAR) | Rang* | | | | | | | | | | | | |
|-----------------|-------|------|------|------|-----|------|------|------|------|------|------|------|-----|
| | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 | 10 | 11 | 12 | 13 |
| (8,2,1) | JIS | JIQ | SLK | TIS | PUG | PUD | TUQ | MSLK | MTIS | TWK | CON | MTWK | TUD |
| (8,2,5) | JIS | JIQ | SLK | TIS | PUD | PUG | TUQ | MSLK | MTIS | CON | MTWK | TWK | TUD |
| (8,2,10) | JIS | JIQ | SLK | PUD | TIS | PUG | TUQ | MSLK | MTIS | CON | MTWK | TWK | TUD |
| (8,3,1) | PUD | MTWK | PUG | TWK | CON | TUQ | MTIS | MSLK | SLK | TIS | JIS | JIQ | TUD |
| (8,3,5) | PUD | PUG | TWK | TUQ | CON | MTWK | MTIS | MSLK | SLK | TIS | JIS | TUD | JIQ |
| (8,3,10) | PUG | TUQ | PUD | CON | TWK | MTWK | MTIS | MSLK | SLK | TIS | JIS | JIQ | TUD |
| (16,1,1) | JIS | JIQ | TIS | SLK | TUQ | PUG | PUD | TWK | MSLK | CON | MTIS | MTWK | TUD |
| (16,1,5) | JIS | JIQ | TIS | SLK | TUQ | PUG | PUD | TWK | CON | MSLK | MTIS | MTWK | TUD |
| (16,1,10) | JIS | JIQ | TIS | SLK | PUG | TUQ | PUD | TWK | MSLK | CON | MTWK | MTIS | TUD |
| (16,2,1) | CON | MTWK | TWK | PUD | PUG | TUQ | MTIS | MSLK | SLK | TIS | JIS | JIQ | TUD |
| (16,2,5) | CON | MTWK | TUQ | TWK | PUG | PUD | MTIS | MSLK | SLK | TIS | JIS | JIQ | TUD |
| (16,2,10) | MTWK | CON | PUG | TWK | PUD | TUQ | MTIS | MSLK | SLK | TIS | JIS | JIQ | TUD |
| (24,1,1) | PUG | PUD | CON | MTWK | TUQ | TWK | MTIS | MSLK | SLK | TIS | JIS | JIQ | TUD |
| (24,1,5) | CON | MTWK | TUQ | TWK | PUG | MSLK | MTIS | PUD | SLK | TIS | JIS | JIQ | TUD |
| (24,1,10) | CON | TUQ | MTWK | PUG | TWK | MSLK | MTIS | PUD | SLK | TIS | JIS | JIQ | TUD |

Notation:JIS méthode *Job In System*JIQ méthode *Job In Queue*SLK méthode *Slack*PUG méthode *Total work content Plus Utilization rates quotient*TUD méthode *Total work content Times Utilization rates quotient*MTIS méthode *Mean Time In System*TIS méthode *Time In System*

*: Les méthodes de DDA sont classées de la meilleure à la pire, du rang 1 au rang 13.

PUD méthode *Total work content Plus Utilization rates difference*CON méthode *Constant*TWK méthode *Total Work Content*MTWK méthode *Mean Total Work Content*MSLK méthode *Mean Slack*TUD méthode *Total work content Times Utilization rates difference*

Tableau XIII

Classement des méthodes de DDA pour les commandes de type 1 sous l'objectif MSL

| (TOJ,MSL,VAR) | Rang* | | | | | | | | | | | | |
|---------------|-------|-----|-----|------|------|------|------|------|------|------|------|------|-----|
| | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 | 10 | 11 | 12 | 13 |
| (8,2,1) | JIS | JIQ | PUD | SLK | TIS | PUG | MTIS | TUQ | CON | MTWK | MSLK | TWK | TUD |
| (8,2,5) | JIS | JIQ | TIS | SLK | PUD | MTIS | PUG | MSLK | TWK | CON | MTWK | TUQ | TUD |
| (8,2,10) | JIS | JIQ | TIS | SLK | PUD | MTIS | MSLK | PUG | CON | TWK | TUQ | MTWK | TUD |
| (8,3,1) | PUD | PUG | TUQ | TWK | CON | MTWK | MSLK | MTIS | SLK | TIS | JIS | JIQ | TUD |
| (8,3,5) | PUD | PUG | TUQ | CON | MTWK | TWK | MSLK | MTIS | SLK | TIS | JIS | JIQ | TUD |
| (8,3,10) | PUD | PUG | TUQ | CON | MTWK | TWK | MSLK | MTIS | SLK | TIS | JIS | JIQ | TUD |
| (16,1,1) | JIS | JIQ | SLK | TIS | PUD | PUG | MSLK | MTIS | TUQ | TWK | MTWK | CON | TUD |
| (16,1,5) | JIS | JIQ | SLK | TIS | PUD | MTIS | MSLK | PUG | TUQ | CON | MTWK | TWK | TUD |
| (16,1,10) | JIS | JIQ | SLK | TIS | PUD | MTIS | MSLK | PUG | TUQ | CON | MTWK | TWK | TUD |
| (16,2,1) | PUG | PUD | TUQ | CON | MTWK | TWK | MSLK | MTIS | SLK | TIS | JIS | JIQ | TUD |
| (16,2,5) | PUD | PUG | TUQ | CON | MTWK | TWK | MSLK | MTIS | TIS | SLK | JIS | JIQ | TUD |
| (16,2,10) | PUD | PUG | TUQ | MTWK | CON | TWK | MSLK | MTIS | SLK | TIS | JIS | JIQ | TUD |
| (24,1,1) | PUG | JIS | PUD | TUQ | TUD | MTWK | CON | TWK | MSLK | MTIS | SLK | TIS | JIQ |
| (24,1,5) | PUG | JIS | PUD | TUQ | TUD | MTWK | CON | TWK | MSLK | MTIS | SLK | TIS | JIQ |
| (24,1,10) | JIS | PUG | PUD | TUQ | TUD | MTWK | CON | TWK | MSLK | MTIS | SLK | TIS | JIQ |

Notation:

JIS méthode Job In System

JIQ méthode Job In Queue

SLK méthode Slack

PUG méthode Total work content Plus Utilization rates quotient

TUQ méthode Total work content Times Utilization rates quotient

MTIS méthode Mean Time In System

TIS méthode Time In System

PUD méthode Total work content Plus Utilization rates difference

CON méthode Constant

TWK méthode Total Work Content

MTWK méthode Mean Total Work Content

MSLK méthode Mean Slack

TUD méthode Total work content Times Utilization rates difference

* : Les méthodes de DDA sont classées de la meilleure à la pire, du rang 1 au rang 13.

Tableau XIV

Classement des méthodes de DDA pour les commandes de type 2 sous l'objectif MSL

| (TOJ,NSS,VAR) | Rang* | | | | | | | | | | | | |
|---------------|-------|-----|------|------|-----|------|------|------|------|-----|------|------|-----|
| 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 | 10 | 11 | 12 | 13 | |
| (8,2,1) | JIS | JIQ | PUD | TIS | SLK | PUG | MSLK | MTIS | TUQ | CON | TWK | MTWK | TUD |
| (8,2,5) | JIS | JIQ | SLK | PUD | TIS | PUG | MSLK | MTIS | TUQ | CON | TWK | MTWK | TUD |
| (8,2,10) | JIS | JIQ | SLK | TIS | PUD | PUG | MSLK | MTIS | TUQ | CON | MTWK | TWK | TUD |
| (8,3,1) | PUD | PUG | TUQ | CON | TWK | MTWK | MSLK | MTIS | SLK | TIS | JIS | JIQ | TUD |
| (8,3,5) | PUG | PUD | CON | MTWK | TUQ | TWK | MSLK | MTIS | SLK | TIS | JIS | TUD | JIQ |
| (8,3,10) | PUD | PUG | CON | MTWK | TUQ | TWK | MSLK | MTIS | SLK | TIS | JIS | JIQ | TUD |
| (16,1,1) | JIS | JIQ | TIS | PUD | SLK | PUG | TUQ | MTIS | MSLK | CON | TWK | MTWK | TUD |
| (16,1,5) | JIS | JIQ | PUD | TIS | SLK | PUG | TUQ | MTIS | MSLK | CON | TWK | MTWK | TUD |
| (16,1,10) | JIS | JIQ | TIS | PUD | SLK | PUG | TUQ | MTIS | MSLK | CON | TWK | MTWK | TUD |
| (16,2,1) | PUG | PUD | MTWK | CON | TWK | TUQ | MSLK | MTIS | SLK | TIS | JIS | JIQ | TUD |
| (16,2,5) | PUG | PUD | MTWK | CON | TWK | TUQ | MSLK | MTIS | SLK | TIS | JIS | JIQ | TUD |
| (16,2,10) | PUG | PUD | MTWK | CON | TWK | TUQ | MSLK | MTIS | SLK | TIS | JIS | JIQ | TUD |
| (24,1,1) | PUG | PUD | CON | MTWK | TWK | TUQ | JIS | MSLK | MTIS | SLK | TIS | JIQ | TUD |
| (24,1,5) | PUD | PUG | CON | MTWK | TWK | TUQ | JIS | MSLK | MTIS | SLK | TIS | JIQ | TUD |
| (24,1,10) | PUD | PUG | CON | MTWK | TWK | JIS | TUQ | MSLK | MTIS | SLK | TIS | JIQ | TUD |

Notation:

JIS méthode Job In System

JIQ méthode Job In Queue

SLK méthode Slack

PUG méthode Total work content Plus Utilization rates quotient

TUQ méthode Total work content Times Utilization rates quotient

MTIS méthode Mean Time In System

TIS méthode Time In System

* : Les méthodes de DDA sont classées de la meilleure à la pire, du rang 1 au rang 13.

PUD méthode Total work content Plus Utilization rates difference

CON méthode Constant

TWK méthode Total Work Content

MTWK méthode Mean Total Work Content

MSLK méthode Mean Slack

TUD méthode Total work content Times Utilization rates difference

5.5 Contextes de temps d'ouverture par jour faible et élevé

5.5.1 TOJ faible

Dans un environnement où le temps d'ouverture par jour est faible, la meilleure méthode est JIS suivie de JIQ. La fenêtre de temps disponible pour traiter la commande étant petite, les files d'attente ont tendance à augmenter car certaines commandes ne peuvent pas être achevées à temps. Les retards des commandes suivantes sont ainsi dus à l'attente devant chaque station. Les fluctuations des temps de traitement sont donc dues à la congestion du système de production. Par conséquent JIS et JIQ qui se basent sur le nombre de pièces dans le système ou dans les files d'attente, sont de bons estimateurs de dates d'exigibilité lorsque le temps d'ouverture par jour est faible.

SLK, et TIS performent bien dans un système de production où le temps d'ouverture par jour est faible. TIS et SLK utilisent dans leur formulation le temps de traitement des commandes passées qui comprend le temps d'attente passé dans le système et la charge de travail effectuée. Plus le temps d'ouverture diminue, plus les fluctuations des temps de traitement des commandes s'expliquent par les fluctuations des temps d'attente. Ainsi, lorsque le temps d'ouverture est faible TIS et SLK performent mieux que les méthodes TWK et ses méthodes dérivées qui ne tiennent compte que de la charge de travail effectuée.

Sous le critère MSL, PUD performe mieux lorsque le temps d'ouverture par jour est faible. PUD est une méthode qui corrige la formule de TWK en ajoutant un terme représentant la variation des taux d'utilisation. Plus le temps d'ouverture diminue, plus la variabilité résultante est importante. Par exemple, pour un temps de traitement de 7.5 ± 1 h, un temps d'ouverture de 8 h signifie le risque de finir la commande soit le jour même soit le lendemain. Pour un même temps de traitement un temps d'ouverture de 16 h assure de finir la commande le jour même. Si le temps d'ouverture par jour

diminue, les taux d'utilisation des stations de travail fluctueront encore plus. En effet, des postes de travail peuvent devenir surchargés à cause de commandes précédentes incomplètes. PUD qui tient compte des fluctuations des taux d'utilisation est alors une bonne estimation. Plus le temps d'ouverture diminue, plus les fluctuations des temps de traitement des commandes s'expliquent par les fluctuations des temps d'attente.

5.5.2 TOJ élevé

La fenêtre de temps disponible pour traiter la commande augmente avec le temps d'ouverture par jour. Cela entraîne une diminution des files d'attente. Les commandes sont moins retardées par l'attente aux stations et plus les fluctuations de temps de traitement des commandes sont dues à la variabilité des temps d'opération. Les méthodes TWK, MTWK, PUQ, TUQ, et PUD qui tiennent compte de la somme des temps d'opération sont donc de bons estimateurs de dates d'exigibilité lorsque le temps d'ouverture par jour est important. En effet, les méthodes PUQ et PUD sont les meilleures méthodes dans un système de production où le nombre de quarts de travail est élevé (voir Figure 19 à la page 84). L'amélioration de la performance de PUD n'est pas sensible dans le contexte de la commande 2 sous le critère MAL.

Dans le contexte de la commande 2, la performance de CON augmente lorsque le nombre de quarts de travail augmente. Quand la fenêtre de temps disponible entre l'arrivée des commandes s'agrandit, les temps de traitement des commandes deviennent plus stables. CON, qui estime le temps de traitement par un paramètre constant, est donc un bon estimateur lorsque le temps d'ouverture par jour est élevé.

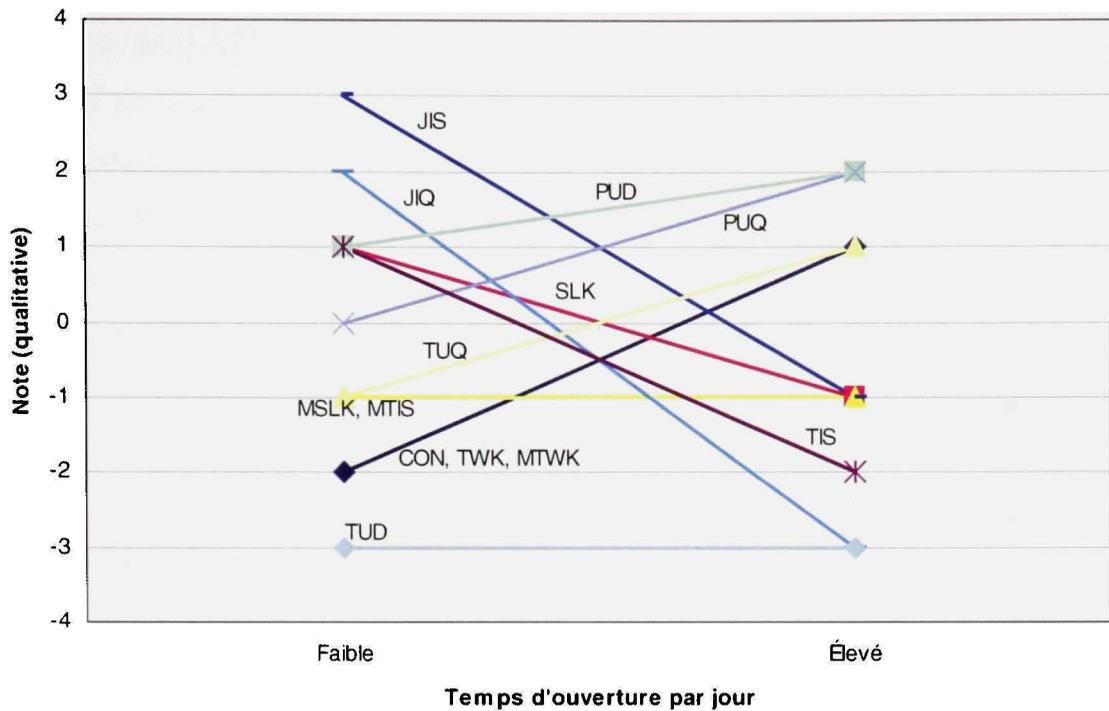


Figure 19 Évolution de la performance des méthodes d'assignation des dates d'exigibilité en fonction du temps d'ouverture par jour

5.6 Contextes de nombre des serveurs par station faible et élevé

5.6.1 NSS faible

Dans un environnement où le nombre de serveurs par station est faible, les meilleures méthodes sont JIS et JIQ (voir Figure 20 à la page 86). En diminuant le nombre de serveur en parallèle, le temps pour effectuer des activités en parallèle est diminué. Par conséquent, les files d'attente augmentent et les commandes entrantes sont retardées à cause de l'attente devant chaque station de travail. Les méthodes JIS et JIQ prennent en compte le nombre de tâches dans le système et la longueur des files d'attente respectivement, et, performent bien dans ce contexte.

SLK et TIS performent bien lorsque le nombre de serveurs en parallèle est faible. TIS et SLK utilisent dans leur formulation le temps de traitement des commandes passées qui comprend du temps d'attente passé dans le système et la charge de travail effectuée. Simultanément à la diminution du nombre de serveurs en parallèle, la fenêtre de temps disponible diminue. Quand la fenêtre de temps disponible au traitement des commandes est faible, les temps d'attente ont tendance à augmenter et alors expliquent les fluctuations des dates d'exigibilité. Ainsi, lorsque le nombre de serveurs par station est faible TIS et SLK performent mieux que les méthodes TWK et ses méthodes dérivées qui ne tiennent compte que de la charge de travail effectuée.

5.6.2 NSS élevé

Dans un environnement où le nombre de serveurs par station est élevé, les meilleures méthodes sont des PUD et PUQ (voir Figure 20 à la page 86). Les méthodes MTWK et CON performent bien ainsi que les méthodes TUQ et TWK. Les méthodes TWK, MTWK, PUD et PUQ performent mieux lorsque le nombre de serveurs en parallèle est élevé. Le calcul de ces méthodes se base sur la charge de travail effectué sur les pièces de la commande (somme des temps d'opération de la commande). Quand le nombre de serveurs par station est à la hausse, la fenêtre de temps augmente. Moins la congestion du système est due aux files d'attente, plus TWK, MTWK, PUD et PUQ sont de bons estimateurs des fluctuations de date d'exigibilité. En effet, lorsque le nombre de serveur en parallèle est important, les fluctuations des dates d'exigibilité sont dues à la variabilité de la charge de travail. PUD est une bonne méthode lorsque NSS est faible et est une très bonne méthode lorsque NSS est élevé. PUD ajoute un terme de correction qui tient compte de la variation des taux d'utilisation et peut donc bien performer même si NSS est faible.

TUQ tient compte aussi de la charge de travail. Dans le contexte de la commande de type 2 sous le critère MAL, TUQ performe mieux lorsque le nombre de serveurs par station est élevé.

La performance de CON augmente lorsque le nombre de serveurs par station augmente. Plus un grand nombre d'opérations peut se faire en parallèle, moins le chemin critique comporte d'opérations et moins sa variabilité est importante. CON qui estime le temps de traitement par un paramètre constant est donc un bon estimateur lorsque le nombre de serveurs par station est élevé.

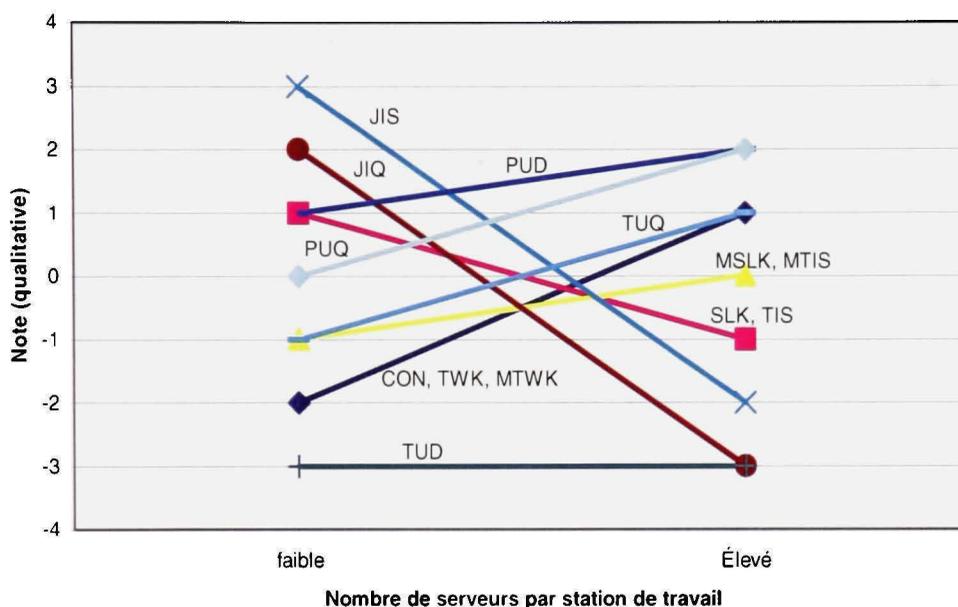


Figure 20 Évolution de la performance des méthodes d'assignation de dates d'exigibilité en fonction du nombre de serveurs par station de travail

5.7 Contextes de variabilité élevé et faible

Il est difficile d'observer une quelconque influence de la variabilité sur le classement. Certaines méthodes voient leur rang modifié avec le changement de variabilité. Mais cette modification n'est pas significative, car les méthodes restent toujours dans le même groupe homogène de méthodes. La variabilité ne change les performances des méthodes qu'à l'intérieur des groupes de méthodes de performance équivalente.

Ce phénomène peut s'expliquer par le fait que l'amplitude de l'effet *VAR* est faible par rapports aux autres effets *TOJ* et *NSS*. En effet, *VAR* varie de 1 % à 10 % alors que *NSS* et *TOJ* varie du simple au triple. Un meilleur choix des trois (3) niveaux pour la variabilité des temps d'opération serait : 6 %, 12 % et 18 %.

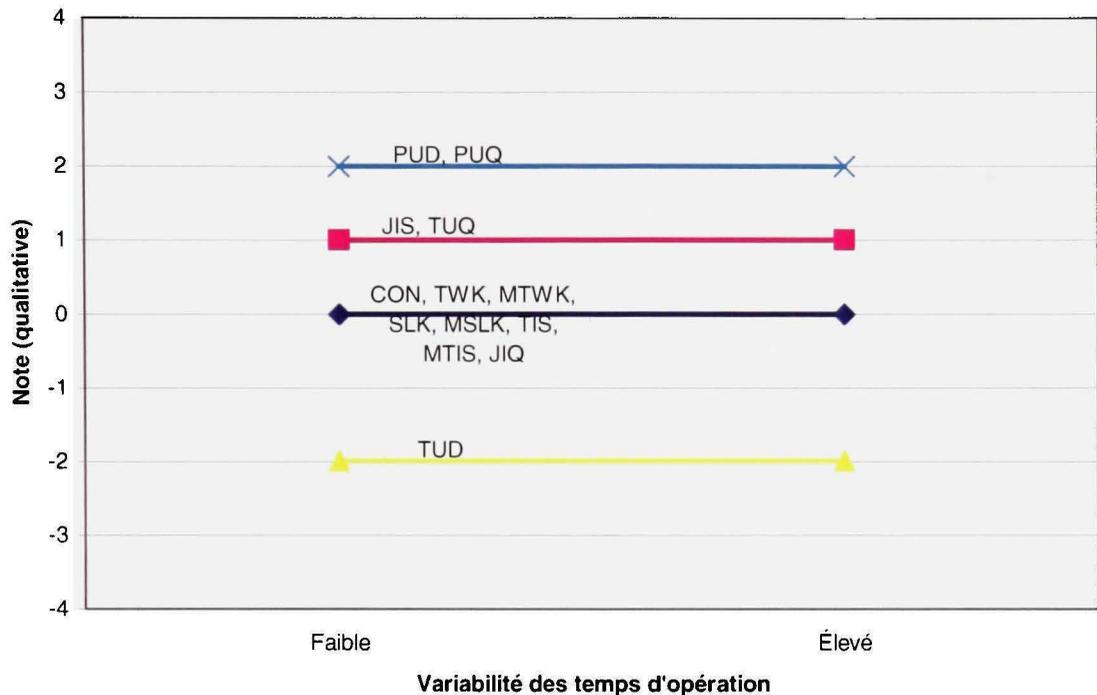


Figure 21 Évolution de la performance des méthodes d'assignation des dates d'exigibilité en fonction de la variabilité des temps d'opération

5.8 Récapitulatif

5.8.1 Classement des méthodes

Du fait de leur performance similaire, *JIS* et *JIQ* sont des méthodes qui se suivent au classement à quelques exceptions. *JIS* et *JIQ* sont des méthodes qui performant bien lorsque le temps d'ouverture par jour ou le nombre de serveurs est faible. *JIS* est toujours meilleure que *JIQ*. Tandis que *JIQ* considère le nombre de pièces dans les files

d'attentes, JIS tient compte de nombre de pièces dans les files d'attentes et en cours de traitement.

SLK et TIS sont une deuxième paire de méthodes dont les performances sont équivalentes. Par conséquent, elles se suivent généralement au classement. Ces deux (2) méthodes performant mieux lorsque le temps d'ouverture par jour ou le nombre de serveurs par station est faible. Ces deux (2) méthodes ont pour trait commun d'intégrer dans leur formulation le temps de traitement des commandes passées.

TUD est la moins performante des méthodes employées. C'est une des nouvelles méthodes introduites au cours de ce projet. Méthode dérivée de TWK, elle tente de corriger les écarts entre les dates d'exigibilité prévues et les dates d'exigibilité réelles en introduisant un terme de correction. Dans le contexte de la réfection, la charge de travail des commandes en cours de traitement n'est pas connue. La formule TWK s'adapte donc en utilisant la charge de travail de la dernière commande traitée par le système. Le terme correctif vise à rectifier cette approximation en considérant l'évolution du taux d'utilisation des stations. TUD utilise donc la différence des taux d'utilisation passé et actuel des stations de travail. Ce terme est multiplié au terme de la charge de travail (voir équation (3.13)). Or la différence peut être positive ou négative (voir équation (3.14)). Ceci rend les prédictions fausses puisque la date prévue peut être alors calculée comme la somme de la date d'arrivée plus un terme positif ou négatif. Cela explique la mauvaise performance de la méthode TUD. Ce phénomène a été possible, car aucune contrainte n'a été posée sur les paramètres à optimiser des méthodes usuelles et par défaut cela a été étendu aux nouvelles méthodes. Rappelons qu'aucune contrainte n'a été fixée car la corrélation entre les différents termes et la date d'exigibilité n'est pas exactement connue.

Les méthodes CON, MSLK, MTIS, MTWK, PUD, PUQ, TUQ et TWK appartiennent toujours au même groupe homogène. Leur performance est relativement bonne quel que

soit le scénario. Les méthodes PUD, PUQ et TUQ sont des méthodes très stables puisque leur rang est toujours supérieur à la neuvième position.

5.8.2 Évolution des méthodes

Première constatation prévisible, le temps d'ouverture par jour et le nombre de serveurs par station influencent les méthodes dans la même direction. En d'autres termes, une méthode qui performe mieux lorsque le temps d'ouverture par jour est élevé performera mieux ou également lorsque le nombre de serveurs par station est élevé. La réciproque et l'inverse sont vrais. En effet, l'augmentation de ces deux (2) paramètres équivaut à l'augmentation de la capacité et de la fenêtre de temps disponible pour traiter les commandes.

La seule méthode qui contredit cette observation est MTIS. Cette méthode performe relativement bien. À la vue du classement, elle est relativement stable puisqu'elle occupe généralement le même rang. De ce fait, de faibles variations dans son rang impliquent qu'elle s'améliore ou se détériore. Sa performance est homogène à celle de MSLK et son comportement est similaire. Globalement, MTIS n'a pas de tendance notable. De plus, le faible nombre de variations significatives (voir Tableau XV) souligne que MTIS n'a pas de comportement notoire selon les variables étudiées TOJ et NSS. MTIS, TUD et MSLK sont les trois (3) méthodes à ne pas montrer de comportement particulier.

Pour les autres méthodes, si leur performance est meilleure lorsqu'une variable (TOJ ou NSS) est élevée et si cette méthode a une tendance pour la deuxième variable (TOJ ou NSS), alors cette méthode sera meilleure lorsque la deuxième variable est élevée. Cette affirmation est aussi valable lorsqu'il s'agit d'un contexte où les variables sont faibles. Le Tableau XV illustre ce propos. Un signe positif signifie que cette méthode est meilleure dans un environnement où cette variable est élevée. Un signe négatif signifie

que la méthode est meilleure dans un contexte où cette variable est faible. Une case vide révèle qu'aucune tendance n'a été mise en évidence.

Tableau XV

Contextes d'application des méthodes de DDA

| Méthodes \ 1 | Temps d'ouverture par jour | | | | Nombre de serveurs par station | | | | Variabilité des temps d'opérations | | | |
|--------------|----------------------------|--------|--------|--------|--------------------------------|--------|--------|--------|------------------------------------|--------|--------|--------|
| | MAL, 1 | MAL, 2 | MSL, 1 | MSL, 2 | MAL, 1 | MAL, 2 | MSL, 1 | MSL, 2 | MAL, 1 | MAL, 2 | MSL, 1 | MSL, 2 |
| CON | + | + | + | + | + | + | + | + | | | | |
| SLK | - | - | - | - | - | - | - | - | | | | |
| MSLK | | | | | | | | | | | | |
| TWK | + | + | + | + | + | + | + | + | | | | |
| MTWK | + | + | + | + | + | + | + | + | | | | |
| TIS | - | - | - | - | - | - | - | - | | | | |
| MTIS | | + | - | | | + | - | | | | | |
| JIS | - | - | - | - | - | - | - | - | | | | |
| JIQ | - | - | - | - | - | - | - | - | | | | |
| TUD | | | | | | | | | | | | |
| PUD | + | | + | + | + | + | + | + | | | | |
| TUQ | + | + | + | + | + | | + | + | | | | |
| PUQ | + | + | + | + | + | + | + | + | | | | |

¹ : Critère de performance (MAL² ou MSL³) et type de commande (1 ou 2)

² : Retard moyen absolu (*Mean Absolute Lateness*)

³ : Retard moyen quadratique (*Mean Square Lateness*)

Un paramètre (NNS, TOJ ou VAR) influence la méthode toujours de la même façon quel que soit les conditions : critère de performance et type de commandes. Par conséquent, le critère de performance et le type de commandes n'ont pas d'influence sur les conditions d'application des méthodes de DDA.

5.8.3 Recommandations

Pour plus de clarté, on établit une notation qualitative calculée en fonction des rangs des méthodes aux différents classements. Les notes sont détaillées dans le Tableau XVI.

Tableau XVI

Comparaison des performances des méthodes de DDA selon le contexte d'application

| Méthodes | Temps d'ouverture par jour | | Nombre de serveurs par station | | Variabilité des temps d'opération | |
|----------|----------------------------|-------|--------------------------------|-------|-----------------------------------|-------|
| | Faible | Élevé | faible | Élevé | Faible | Élevé |
| CON | -2 | 1 | -2 | 1 | 0 | 0 |
| SLK | 1 | -1 | 1 | -1 | 0 | 0 |
| MSLK | -1 | -1 | -1 | 0 | 0 | 0 |
| TWK | -2 | 1 | -2 | 1 | 0 | 0 |
| MTWK | -2 | 1 | -2 | 1 | 0 | 0 |
| TIS | 1 | -2 | 1 | -1 | 0 | 0 |
| MTIS | -1 | -1 | -1 | 0 | 0 | 0 |
| JIS | 3 | -1 | 3 | -2 | 1 | 1 |
| JIQ | 2 | -3 | 2 | -3 | 0 | 0 |
| TUD | -3 | -3 | -3 | -3 | -2 | -2 |
| PUD | 1 | 2 | 1 | 2 | 2 | 2 |
| TUQ | -1 | 1 | -1 | 1 | 1 | 1 |
| PUQ | 0 | 2 | 0 | 2 | 2 | 2 |

Les performances des méthodes sont notées de très bonnes (+3) à très mauvaises (-3).

Le tableau précédent résume les résultats des sections 5.5 à 5.7. Dans un contexte où le temps d'ouverture ou le nombre de serveurs par station est faible, JIS et JIQ sont les méthodes à mettre en œuvre de préférence. Dans le cas où le temps d'ouverture par jour ou le nombre de serveurs par station est élevé, les méthodes à étudier en premier lieu

sont PUD et PUQ. JIS est meilleure que JIQ. Nous avons choisi d'étudier plus en détail les trois (3) méthodes, PUD, PUQ et JIS dans le chapitre suivant (chapitre 5). Dans ce prochain chapitre, nous quantifierons l'influence des paramètres (NSS, TOJ, et VAR) sur les performances de ces méthodes.

Dans des contextes de variabilité faible ou élevée, il est difficile de préconiser une méthode. L'ensemble des méthodes ne montre pas d'évolution significative selon la variabilité. Une étude plus poussée est nécessaire pour pouvoir conclure. Il est aussi notable que la méthode CON performe relativement bien comparée aux autres méthodes lorsque le temps d'ouverture par jour ou le nombre de serveurs en parallèle est élevé. Ceci implique qu'aucune méthode ne considère des attributs qui prédisent correctement les dates d'exigibilité lorsque le temps d'ouverture par jour ou le nombre de serveurs en parallèle est élevé. Finalement, on observe que les nouvelles méthodes développées au cours de ce projet ont gagné en stabilité. En d'autres termes, l'écart de performance entre des contextes où le paramètre est élevé et faible est moindre pour les nouvelles méthodes. C'est le cas des méthodes MTIS, MSLK, MTWK ainsi que TUD, PUD, TUQ et PUQ. SLK est aussi une méthode qui performe relativement bien quelle que soit l'organisation du centre de réfection.

Ces résultats s'appuient sur un système de réfection relativement simple. La deuxième partie du chapitre suivant, le Chapitre 5, vise à étudier un système de réfection réel. la méthode de planification de ce système est SLK. Les gestionnaires de cette entreprise souhaitent agrandir la capacité de traitement. Plusieurs solutions seront proposées. Nous comparerons aussi deux (2) autres méthodes alternatives de planification.

CHAPITRE 6

VALIDATION DES MODÈLES ET CAS RÉELS

6.1 Validation des comportements des méthodes

6.1.1 Modèles de régression

Le but de ce chapitre est de mettre en évidence l'influence des paramètres (nombre de serveurs en parallèle, temps d'ouverture par jour et variabilité des temps d'opération) sur les performances des méthodes PUD (*Total work content Plus Utilization rates Difference*), PUQ (*Total work content Plus Utilization rates Quotient*) et JIS (*Jobs In System*). Les mécanismes qui déterminent les performances des procédures directes (JIS, PUD et PUQ) sont inconnus du fait de la complexité des centres de réfection et du manque de théorie. Ceci incite à utiliser des modèles polynomiaux. D'autres raisons motivent ce choix.

Tout d'abord, toute fonction mathématique linéaire ou non peut être développée en série de Taylor. Quelle que soit sa complexité, toute fonction peut être approximée par un polynôme sur un intervalle donné. Le nombre de termes nécessaires à cette approximation dépend de la complexité de la fonction, de l'étendue des variables et de l'utilisation de l'approximation. Lorsque le modèle polynomial s'apparente à une série de Taylor, il est possible de déduire un modèle nonlinéaire plus approprié. Plus le degré du modèle polynomial est important, plus le modèle est précis : la courbe de régression peut se fléchir. Un principe important de la modélisation par polynômes est la parcimonie. Le degré du polynôme doit être augmenté progressivement jusqu'à obtenir un modèle satisfaisant ou arrêter à un critère d'arrêt.

Les modèles polynomiaux ont des désavantages. Notamment, on peut aboutir à des polynômes complexes de degré élevé afin d'obtenir une estimation satisfaisante alors qu'un modèle nonlinéaire aurait pu conduire à une forme plus simple. Le second risque des modèles polynomiaux est de vouloir les utiliser à l'extérieur du domaine observé. Les modèles polynomiaux n'ont pas pour but d'extrapoler les mécanismes du système étudié sachant que ceux-ci peuvent être complètement différents à l'extérieur du domaine étudié. Un autre danger est la colinéarité. La colinéarité en statistique indique la redondance de certains facteurs. En d'autres termes, deux (2) variables sont colinéaires s'il existe une relation approximativement linéaire de dépendance entre celles-ci. Fréquemment, les facteurs ne sont pas redondants, mais sont proches de l'être. Quelles sont les conséquences de la colinéarité ?

- a. Plus la colinéarité augmente, plus les valeurs numériques des coefficients de régression deviennent instables. L'ajout ou le retrait de certaines observations produit des changements importants dans les valeurs des coefficients.
- b. La colinéarité diminue fortement la précision des estimations des coefficients de régression. Ainsi, les variances et donc les intervalles de confiance sont plus grands lorsqu'il y a colinéarité.
- c. Puisque les variances de variables colinéaires sont importantes, le test de Student sur la contribution marginale de chaque paramètre aura tendance à rejeter l'hypothèse nulle (paramètre non significatif).

Ainsi, un modèle peut être jugé significatif alors que la contribution réelle de chaque variable ne l'est pas. Subséquemment, l'équation de régression est valide pour être utilisée à des fins de prévision ou d'estimation, mais elle ne l'est pas pour estimer l'effet marginal de chaque variable explicative.

On peut réduire l'effet de colinéarité de plusieurs façons :

- a. En effectuant un choix initial judicieux des variables explicatives ;

- b. En s'assurant que le nombre d'observations dépassent largement le nombre de variables explicatives ;
- c. En retranchant une par une les variables dont les variances sont trop élevées. La régression est à refaire après chaque retrait.

Pour limiter l'effet de la colinéarité et assurer la validité du modèle, une procédure est mise en place afin d'évaluer, mettre à jour et optimiser les modèles de régression. Les figures suivantes illustrent cette démarche.

La première étape est la validation et l'optimisation des modèles de régression en utilisant les variables explicatives CAP (capacité du système égale au produit de NSS par TOJ) et VAR. Ces deux (2) variables sont des variables quantitatives. On rajoute une troisième variable, COM, le type de commande. On vise à vérifier que les performances des méthodes sont indépendantes du type de commande. Le but de cette étape est de vérifier si la capacité permet d'expliquer les variations des méthodes d'assignation des dates d'exigibilité (DDA). Elle permet aussi de limiter le nombre de variables explicatives et donc de diminuer la probabilité qu'il y ait colinéarité. Même si un effet présente une colinéarité, le signe de celui-ci peut être étudié si un changement de signe n'est pas possible dans l'intervalle de confiance de l'estimation. Par exemple, si l'effet est positif dans l'intervalle de confiance, alors cet effet positif est validé sans toutefois être mesuré.

6.1.2 Validation des modèles

La Figure 22 décrit la méthodologie d'analyse du modèle selon les paramètres significatifs CAP, VAR et COM. Tout d'abord, on enlève les effets qui sont une combinaison des autres effets. Lorsque tous les effets sont indépendants, on teste la significativité des effets. Si un effet explique les variations des performances de la méthode d'assignation des dates d'exigibilité (DDA), il est alors retiré du modèle.

Pratiquement, le seuil de significativité d'un terme est établi à 90 % (seuil fixé par défaut dans Statgraphics® Plus5). Si ce seuil n'est pas atteint, alors le terme est jugé non significatif et est retiré du modèle. Cette étape est répétée jusqu'à ce que tous les effets du modèle soient significatifs.

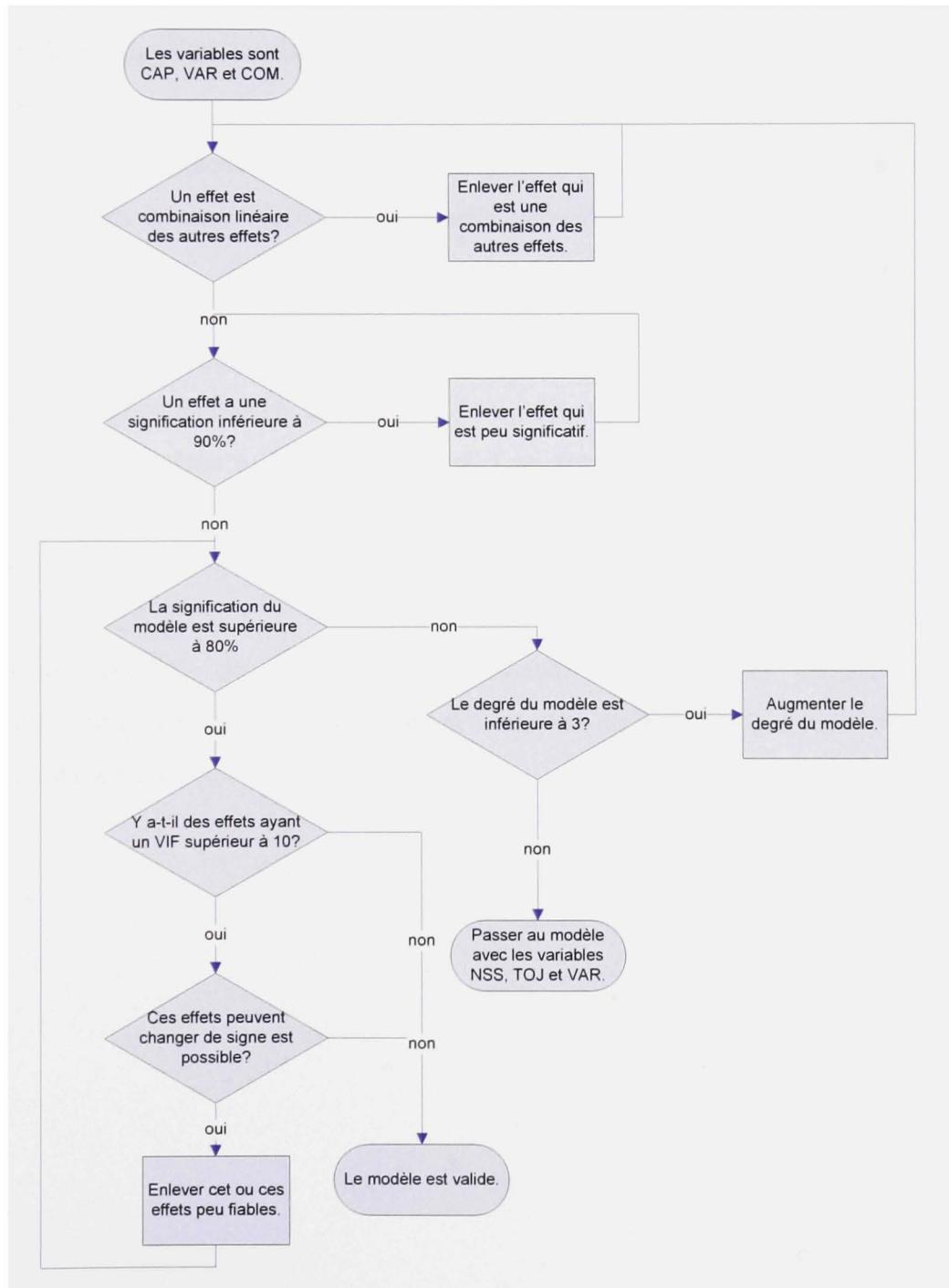


Figure 22 Procédure de validation et d'optimisation des modèles de régression avec les variables explicatives CAP et VAR

A ce moment-là, la significativité du modèle, R_{adj}^2 , est comparée au seuil de 80 % (Hajji, 2005). Si un modèle peut expliquer 80 % de la variabilité de la performance d'une méthode de DDA, alors ce modèle est jugé valide. Si le modèle n'est pas significatif alors le degré du modèle est augmenté et on recommence la procédure. Le degré 3 est le plus haut degré qui sera étudié, car plus le degré augmente, plus le risque de multicollinéarité augmente et moins les nouveaux termes améliorent le modèle. Les calculs des tests de significativité sont détaillés dans l'Annexe 7.

La noncolinéarité des effets est alors vérifiée. Le VIF (*Variance Inflation factor*) mesure la corrélation entre les effets. Les effets dont le VIF est supérieur à 10 et qui peuvent changer de signe sont retirés du modèle. Le modèle final est obtenu une fois ces effets retirés. Lorsque même le modèle de degré 3 ne permet d'expliquer les variations des performances de la méthode de DDA, on passe à un modèle qui comporte les paramètres : NSS, TOJ, VAR et COM.

L'analyse statistique de ce modèle est présentée à la Figure 23. La procédure est identique à une exception près. En effet, si le modèle de degré 3 n'est pas significatif, la procédure est terminée.

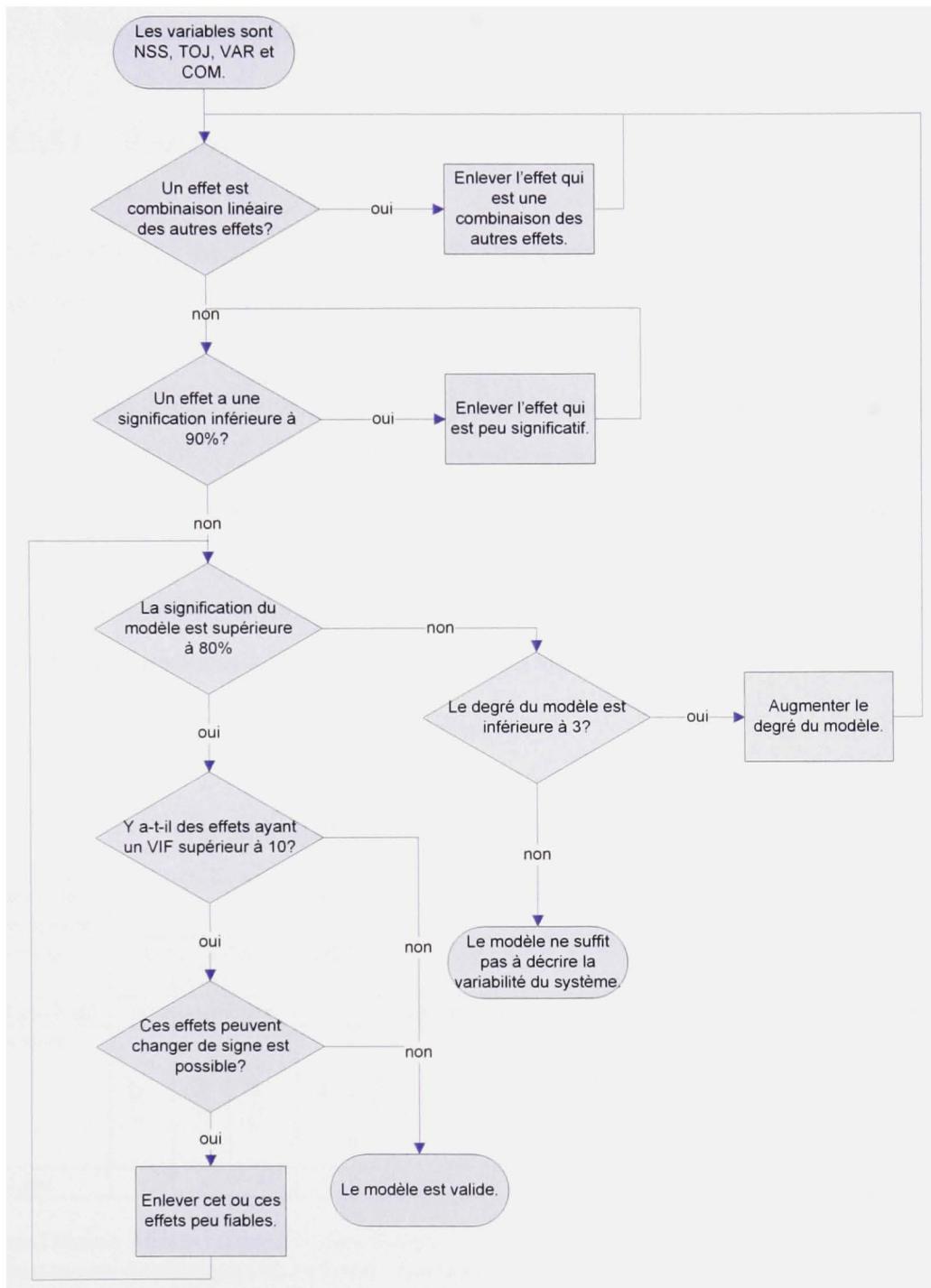


Figure 23 Procédure de validation et d'optimisation des modèles de régression utilisant les variables NSS, TOJ et VAR

6.1.3 Résultats et modèles

6.1.3.1 Étude de JIS

Le modèle basé sur la capacité et la variabilité n'a jamais suffi à expliquer les variations des performances de JIS (voir Annexe 8 et Annexe 9). A son instar, le modèle basé sur NSS, TOJ et VAR n'a jamais permis d'expliquer au moins 80 % des fluctuations du modèle. Malgré cela, cette étude permet de confirmer plusieurs observations précédentes (voir Tableau XVII). En effet, le type de commande n'influence effectivement pas les performances de JIS. De plus, la variabilité des temps d'opérations n'est pas un facteur influent pour les niveaux de variabilité utilisés dans l'étude. Par ailleurs, les termes constants des modèles de régression sont de signes positifs. Ceci valide le fait que les critères de performances MAL et MSL sont positifs.

Tableau XVII

Signe des paramètres influents des modèles de JIS

| Critère de performance | MAL ¹ | | | | | | | | MSL ² | | | | | | | |
|------------------------|----------------------------|-----|------------------|---------------------------------|-----|-----|------------------|------------------|------------------|-----|------------------|--------------------|-----|-----|------------------|------------------|
| | CAP, VAR, COM ³ | | | NSS, TOJ, VAR, COM ⁴ | | | | | CAP, VAR, COM | | | NSS, TOJ, VAR, COM | | | | |
| Significativité | non significatif | | | non significatif | | | | | non significatif | | | non significatif | | | | |
| Termes | CST ⁵ | CAP | CAP ² | CST | NSS | TOJ | NSS ² | TOJ ² | CST | CAP | CAP ² | CST | NSS | TOJ | NSS ² | TOJ ² |
| Signe | + | - | + | + | - | + | + | - | + | - | + | + | - | + | + | - |

¹ : Retard Moyen Absolu (*Mean Absolute Lateness*)

² : Retard moyen quadratique (*Mean Square Lateness*)

³ : CAP; capacité, VAR; variabilité des temps d'opération et COM; type de commande.

⁴ : NSS; nombre de serveurs par station et TOJ; temps d'ouverture par jour

⁵ : Terme constant du modèle de régression

On remarque que le comportement de JIS semble être le même sous MAL et MSL. Effectivement, les termes significatifs et leur signe sont identiques sous les critères de performance MAL et MSL. Malheureusement le comportement de JIS ne peut être étudié plus en profondeur car les modèles ne sont pas significatifs : ils expriment moins de 80 % de la variabilité de JIS. En d'autres termes plus de 20% du modèle de régression ne correspond pas aux fluctuations de JIS.

La procédure a mis en évidence un trait important de la méthode. Le modèle de degré 3 a été étudié afin d'améliorer le modèle précédent, de degré 2. Mais les termes de degré 3 sont non significatifs ou combinaison des autres termes. Finalement, le degré 2 est le modèle polynomial qui contient tous les termes significatifs. Pour obtenir un meilleur modèle de régression, il faut déterminer un nouveau type de modèle qui soit approprié. Malheureusement, le type de modèle approprié est inconnu.

6.1.3.2 Étude de PUD

PUD (*Total work content Plus Utilization rates Difference*) est la méthode d'assignation des dates d'exigibilité qui tient compte de la charge totale de travail et de la différence des taux d'utilisation entre la date de rentrée de la commande et la dernière date de l'historique des données. Seul le modèle basé sur NSS, TOJ et VAR a réussi à expliquer plus de 80 % des fluctuations de PUD sous le critère de performance MAL (voir Annexes 10 et 11). L'obtention de ce modèle permet de vérifier plusieurs observations du chapitre 4. En effet, le type de commande et la variabilité des temps d'opération n'influencent pas les performances de PUD. Par ailleurs, les termes constants des modèles sont positifs. Ceci est prévisible car les critères de performance MAL et MSL sont toujours positifs par définition. MAL et MSL sont respectivement des retards moyens absolu et quadratique.

Un examen plus approfondi du modèle significatif obtenu pour PUD sous le critère MAL procure d'autres informations (voir équation (6.1)). Les effets présentent une forte multicolinéarité et donc l'influence des facteurs ne peut être comparée. Cependant, l'étude globale du modèle et de leurs signes est fort utile. Tout d'abord, on constate que la performance de PUD s'améliore lorsque le temps d'ouverture par jour est élevé. Ceci est dû au signe négatif du coefficient du terme TOJ^2 . Le modèle comporte deux termes fonction de NSS qui sont de signe opposé. Pour connaître le comportement de PUD en fonction de NSS une étude de la dérivée du modèle est nécessaire (voir équations (6.2) et (6.3)).

$$MAL_{PUD} = 310.52 - 173.572NSS + 25.8525NSS^2 - 0.236459TOJ^2 \quad (6.1)$$

$$\forall NSS \in \{1; 2; 3\}, TOJ \in [0; 24]$$

On note MAL_{PUD} la performance de la méthode PUD sous le critère de performance MAL exprimé en heures (h).

$$\frac{\partial MAL_{PUD}}{\partial NSS} = -173.572 + 25.8525 \cdot 2 \cdot NSS \quad (6.2)$$

$$\frac{\partial MAL_{PUD}}{\partial NSS} \leq 0 \quad \forall NSS \in \{1; 2; 3\} \quad (6.3)$$

On en conclut que la performance MAL de la méthode PUD augmente lorsque le nombre de serveurs par station augmente.

D'après le Tableau XVIII, le comportement de PUD est sensiblement identique sous les critères MAL et MSL. Les termes significatifs sous MAL le sont aussi sous MSL. TOJ est le seul terme supplémentaire qui est significatif dans le modèle (NSS, TOJ, VAR, COM) sous MSL par rapport au même modèle sous MAL.

De même que pour le modèle JIS, le modèle de degré 2 est le plus approprié pour décrire les fluctuations de ses performances. Une meilleure explication des fluctuations pourrait être obtenue en établissant un modèle nonlinéaire.

Tableau XVIII

Signe des paramètres influents des modèles de PUD

| Critère de performance | MAL ¹ | | | | | | | MSL ² | | | | | | | |
|------------------------|----------------------------|-----|------------------|---------------------------------|-----|------------------|------------------|------------------|-----|------------------|--------------------|-----|-----|------------------|------------------|
| | CAP, VAR, COM ³ | | | NSS, TOJ, VAR, COM ⁴ | | | | CAP, VAR, COM | | | NSS, TOJ, VAR, COM | | | | |
| Significativité | non significatif | | | significatif | | | | non significatif | | | non significatif | | | | |
| Termes | CS1 ⁵ | CAP | CAP ² | CS1 | NSS | NSS ² | TOJ ² | CS1 | CAP | CAP ² | CS1 | NSS | TOJ | NSS ² | TOJ ² |
| Signe | + | - | + | + | - | + | - | + | - | + | + | - | + | + | - |

¹ : Retard Moyen Absolu (*Mean Absolute Lateness*)

² : Retard moyen quadratique (*Mean Square Lateness*)

³ : CAP; capacité, VAR; variabilité des temps d'opération et COM; type de commande.

⁴ : NSS; nombre de serveurs par station et TOJ; temps d'ouverture par jour

⁵ : Terme constant du modèle de régression

6.1.3.3 Étude de PUQ

Les résultats de PUQ sont similaires à ceux obtenus pour PUD. Ainsi, le seul modèle significatif est le modèle dont les facteurs sont NSS, TOJ et VAR sous le critère MAL (voir Annexe 12 et Annexe 13). Nous voyons que le type de commande et la variabilité des temps d'opération ne sont pas des effets significatifs (voir Tableau XIX). La performance de PUQ s'améliore lorsque le temps d'ouverture par jour est élevé. Ceci est dû au signe négatif du coefficient du terme TOJ².

Le modèle contient deux (2) termes fonction de NSS qui sont de signe opposé. Il n'est donc pas possible de connaître le comportement de PUQ en fonction de NSS au premier coup d'œil. Nous établissons la même méthode que pour PUD, à savoir l'analyse de la fonction dérivée (voir équations (6.4), (6.5) et (6.6)). MAL_{PUQ} est la performance de la méthode PUQ sous le critère de performance MAL exprimé en heures (h).

$$MAL_{PUQ} = 313.543 - 173.847NSS + 25.659NSS^2 - 0.24132TOJ^2 \quad (6.4)$$

$$\forall NSS \in \{1; 2; 3\}, TOJ \in [0; 24]$$

$$\frac{\partial MAL_{PUQ}}{\partial NSS} = -173.847 + 25.659NSS \quad (6.5)$$

$$\frac{\partial MAL_{PUQ}}{\partial NSS} \leq 0 \quad \forall NSS \in \{1; 2; 3\} \quad (6.6)$$

La performance MAL de la méthode PUQ augmente lorsque le nombre de serveurs par station augmente.

Finalement pour les trois (3) méthodes retenues, JIS, PUQ, et PUD, les termes de troisième degré n'améliorent pas le modèle. Pour obtenir une explication plus significative, il faudrait établir des modèles nonlinéaires ou des transformations de la réponse peut-être.

Tableau XIX

Signe des paramètres influents des modèles de PUQ

| Critère de performance | MAL ¹ | | | | | | | MSL ² | | | | | | | |
|------------------------|----------------------------|-----|------------------|---------------------------------|-----|------------------|------------------|------------------|-----|------------------|--------------------|-----|-----|------------------|------------------|
| | CAP, VAR, COM ³ | | | NSS, TOJ, VAR, COM ⁴ | | | | CAP, VAR, COM | | | NSS, TOJ, VAR, COM | | | | |
| Significativité | non significatif | | | significatif | | | | non significatif | | | non significatif | | | | |
| Termes | CST ⁵ | CAP | CAP ² | CST | NSS | NSS ² | TOJ ² | CST | CAP | CAP ² | CST | NSS | TOJ | NSS ² | TOJ ² |
| Signe | + | - | + | + | - | + | - | + | - | + | + | - | + | + | - |

¹ : Retard Moyen Absolu (*Mean Absolute Lateness*)² : Retard moyen quadratique (*Mean Square Lateness*)³ : CAP: capacité, VAR: variabilité des temps d'opération et COM: type de commande.⁴ : NSS: nombre de serveurs par station et TOJ: temps d'ouverture par jour⁵ : Terme constant du modèle de régression

6.1.3.4 Comparatif de PUD et PUQ sous le critère MAL

On sait d'après le classement effectué précédemment que PUD et PUQ performant de manière équivalente et ont un comportement semblable. Elles performant bien lorsque le temps d'ouverture par jour ou le nombre de serveurs par station est élevé. Cette section vise à départager ces deux (2) méthodes (voir équations (6.7) à (6.11)). En d'autres termes, on cherche à déterminer le domaine dans lequel PUD est meilleure que PUQ et vice versa. Pour cela, on utilise les modèles de régression de ces deux (2) méthodes.

$$MAL_{PUD} - MAL_{PUQ} = (310.52 - 173.572NSS + 25.8525NSS^2 - 0.236459TOJ^2) - (313.543 - 173.847NSS + 25.659NSS^2 - 0.24132TOJ^2) \quad (6.7)$$

$$MAL_{PUD} - MAL_{PUQ} = -3.023 + 0.275NSS + 0.1935NSS^2 + 0.004861TOJ^2 \quad (6.8)$$

L'utilisation de PUD prévaut sur PUQ lorsque l'équation (6.8) est négative. Le domaine de prédominance de PUQ est défini lorsque l'équation (6.8) est positive. L'équation (6.9) décrit la frontière entre les domaines de prédominance de PUD et de PUQ. Sur cette frontière, on peut choisir indifféremment PUD et PUQ.

$$MAL_{PUD} - MAL_{PUQ} = 0 \quad (6.9)$$

$$-3.023 + 0.275NSS + 0.1935NSS^2 + 0.004861TOJ^2 = 0 \quad (6.10)$$

$$TOJ = \sqrt{621.8885 - 56.5727NSS - 39.8066NSS^2} \quad (6.11)$$

Pour $NSS = 1$, $TOJ = 22.92$ h

Pour $NSS = 2$, $TOJ = 18.7$ h

Pour $NSS = 3$, $TOJ = 9.7$ h

Finalement, on en conclut que PUD performe mieux que PUQ sur les domaines :

$NSS = 1$ et $TOJ \leq 22.92$ h; $NSS = 2$ et $TOJ \leq 18.7$ h et $NSS = 3$ et $TOJ \leq 9.7$ h

Finalement, on en déduit qu'on utilise PUQ sur son domaine de prédominance qui est :

$NSS = 1$ et $TOJ > 22.92$ h; $NSS = 2$ et $TOJ > 18.7$ h et $NSS = 3$ et $TOJ > 9.7$ h

On remarque donc que PUD s'applique à des systèmes dont la capacité est moindre. PUQ s'emploie dans des systèmes moins chargés. On remarque aussi que le domaine d'application de PUD diminue avec le nombre de serveurs en parallèles. Fait remarquable, ce domaine est pratiquement défini par une droite (voir Figure 24).

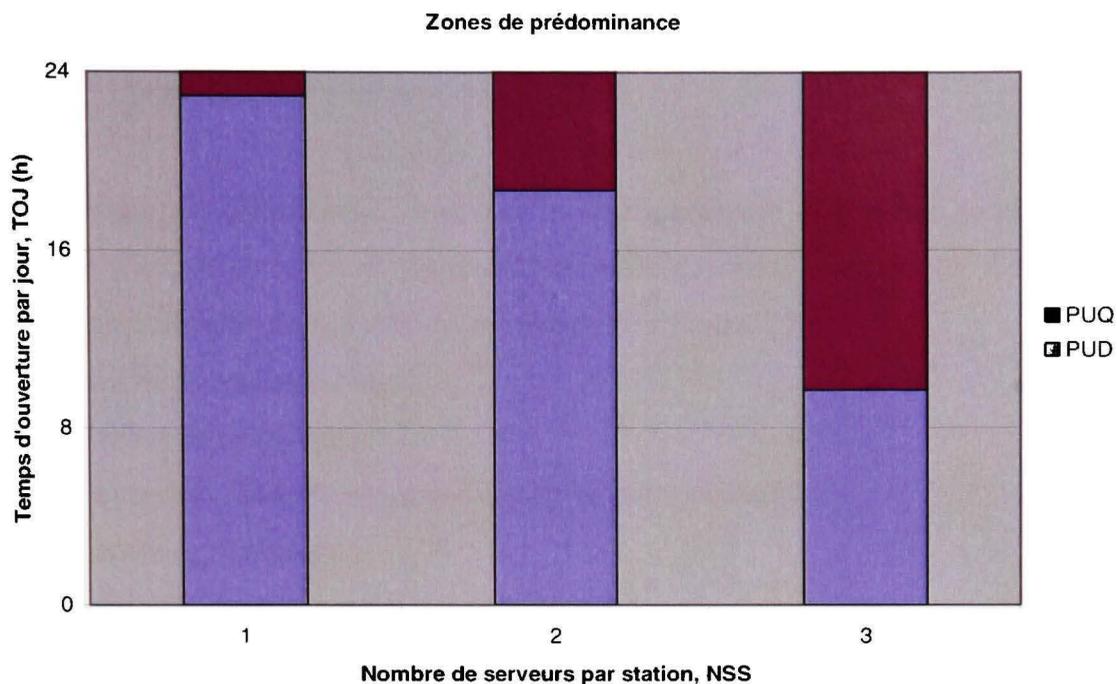


Figure 24 Domaine d'application de PUD et de PUQ sous le critère MAL

6.1.4 Récapitulatif de la validation des modèles

Cette section a mis en évidence l'influence des paramètres (temps d'ouverture par jour, nombre de serveurs par station, variabilité des temps d'opération) sur les performances des méthodes d'assignation des dates d'exigibilité : JIS, PUD et PUQ. Plusieurs points communs observés au Chapitre 4 ont pu être vérifiés. Ainsi, le type de commande (COM) et la variabilité des temps d'opération (VAR) n'ont pas d'influence sur la performance MAL des méthodes PUD et PUQ pour le système étudié. Les modèles polynomiaux ont seulement pu expliquer les variations de performances à deux (2) reprises. Le comportement des méthodes JIS, PUD et PUQ est donc non linéaire. Comparé à PUD, la méthode PUQ est pressentie pour performer mieux dans des processus avec de nombreux serveurs en parallèle.

6.2 Étude d'un cas réel

6.2.1 Description du système de réfection

Le processus de réfection est basé sur le fonctionnement des usines de réfection de moteurs d'avion. La structure du produit est celle décrite à la Figure 11. Ce processus s'organise autour de six (6) stations de travail (voir Figure 25) :

- a. Le centre de désassemblage :
- b. La station de nettoyage :
- c. Le centre des tests, d'inspections et de tests non-destructifs :
- d. Le centre de réparation :
- e. La station d'assemblage :
- f. La station d'emballage.

Dans le cas simulé, les centres de désassemblage et d'assemblage sont un même et seul centre de travail. Ils sont séparés sur la Figure 25 pour plus de clarté.

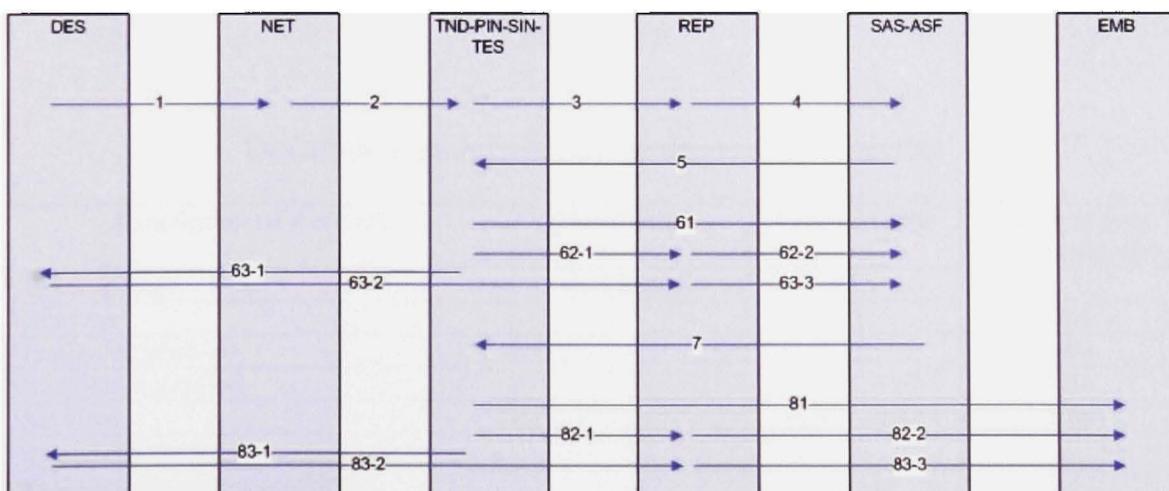


Figure 25 Schéma du processus réel de réfection

Décrivons l'ensemble du processus. Le produit est donc désassemblé (DES), nettoyé (NET), inspecté et testé (TND, PIN) puis réparé (REP) et sous-assemblé. C'est la séquence des activités 1-2-3-4. L'activité 5 est l'envoi des sous-assemblages à l'inspection (SIN). Trois (3) possibilités sont envisagées par la suite :

- a. Le sous-assemblage est opérationnel (61) ;
- b. Le sous-assemblage est à réparer (flux 62-1 et 62-2) ;
- a. Les pièces du sous-assemblage sont à réparer (flux 63-1; 63-2 et 63-3).

Une fois que le produit est à l'assemblage final (après les opérations 61; 62-2 et 63-3), il est ensuite renvoyé pour un test final (activité 7). Trois (3) possibilités sont également envisagées après cette étape :

- a. L'assemblage final est opérationnel (81) ;
- b. L'assemblage final est à réparer (82-1 et 82-2) ;
- c. Les sous-assemblages sont à réparer (83-1; 83-2 et 83-3).

Les opérations d'emballage marquent la fin du processus. Le Tableau XX présente les différentes activités du processus.

Tableau XX

Description des activités du système de réfection réel

| Description de l'activité | Flux d'entrée | Flux de sortie | Temps moyen d'opération (jr) |
|--|---------------------|------------------|------------------------------|
| Désassemblage | 63-1 et 83-1 | 1 | 1.33 |
| Nettoyage | 1 | 2 | 6.66 |
| Première inspection | 2 | 3 | 1.66 |
| Deuxième inspection | 5 | 61; 62-1 et 63-1 | 1.66 |
| Test Final | 7 | 81; 82-1 et 83-1 | 1.66 |
| Réparation | 3 | 4 | 5 |
| Réparation des sous-assemblages | 62-1 | 62-2 | 3.33 |
| Deuxième réparation des pièces | 63-2 | 63-3 | 5 |
| Réparation de l'assemblage final | 82-1 | 82-2 | 1.66 |
| Deuxième réparation des sous-assemblages | 83-2 | 83-3 | 3.33 |
| Emballage | 81; 82-2 et 83-3 | | 0.66 |
| Assemblage | 4; 61; 62-2 et 62-3 | 5 et 7 | 0.66 |

Chaque possibilité après les tests et inspections est prise en fonction d'une certaine probabilité. À la seconde inspection et au test final (SIN et TES) les probabilités sont les suivantes:

- a. 15 % des cas : la réparation est insuffisante, la prochaine séquence est la réparation de l'assemblage (séquences 62-1, 62-2 et 82-1, 82-2) ;
- b. 5 % des cas sous la condition de ne pas avoir déjà subi une réparation inefficace : la réparation est inefficace, les prochaines étapes sont le désassemblage puis la réparation des composants (séquences 63-1, 63-2, 63-3 et 83-1, 83-2, 83-3) ;
- c. Dans les autres cas : la réparation a été efficace et le produit passe à la prochaine étape (séquences 61 et 81).

La condition à la deuxième possibilité empêche un produit de rester indéfiniment dans le système. Sans cette condition, il peut se produire la situation où la réparation est toujours à refaire car inefficace. Cette hypothèse est raisonnable dans le sens où lorsque les réparations sont effectuées une deuxième fois, elles ne sont pas requises une troisième fois.

Chaque atelier peut contenir jusqu'à trois (3) postes de travail fonctionnant sur la règle de priorité vue dans le cas d'étude, FIFO (« *first in first out* »). Les nombres de serveurs et les taux d'utilisation des stations sont indiqués dans le Tableau XXI. Les taux d'utilisation sont donnés dans les rapports de simulation que génère Awesim.

Tableau XXI

Description des stations de travail

| Station | Nombre de serveurs en parallèle | Taux d'utilisation (%) |
|---|---------------------------------|------------------------|
| Désassemblage/assemblage | 1 | 30.8 |
| Nettoyage | 2 | 73 |
| Tests, des inspections et des tests non-destructifs | 1 | 61.9 |
| Réparation | 2 | 62 |
| Emballage | 1 | 2.4 |

L'arrivée des commandes suit un processus de Poisson. Le processus de Poisson est utilisé car c'est un processus où les temps interarrivées sont indépendants et identiquement distribués. Le temps moyen d'interarrivée est de 21 jours. Le test à la réception des commandes refuse toutes commandes lorsqu'il y a au moins trois (3) commandes en cours de traitement. Le temps de traitement d'une commande est d'environ 50 jours. La méthode de planification est SLK.

6.2.2 Scénarios et critères de performance

La situation actuelle présente plusieurs inconvénients. Les gestionnaires de l'entreprise souhaiteraient diminuer le nombre de commandes refusées à la réception et réduire le temps de traitement des commandes. La performance est jugée sur MAL et le nombre de commandes refusées. Le critère de performance, MAL, est mesuré sur les 10 commandes suivantes.

Les paramètres de la simulation sont le nombre de postes et le nombre de quarts de travail. Il y a donc trois (3) scénarios: la situation actuelle et deux (2) alternatives.

- a. Scénario de base (SC1): N_i serveurs par station i et 2 quarts de travail (16h par jour)
- b. Alternative 1 (SOL1): N_i serveurs par station i et 3 quarts de travail (24h par jour)
- c. Alternative 2 (SOL2): N_i+1 serveurs par station i et 2 quarts de travail (16h par jour)

6.2.3 Simulation

L'approche de simulation est la même que celle utilisée dans l'étude préliminaire. Le logiciel utilisé est Awesim. Il y a 10 répliques pour chaque scénario. Les nombres sources sont fixés afin de :

- a. Créer des simulations reproductibles ;
- b. Différencier des activités dont les temps moyens d'opération sont identiques ;

- c. Assurer que les différences observées soient le résultat de politiques différentes et non de variations aléatoires.

La période transitoire est de cinq (5) commandes. Le paramètre de SLK est calculé sur 10 commandes suivantes. Le réseau de simulation est disponible en Annexe 14. Le fichier de contrôle qui décrit les paramètres de simulation est placé à l'Annexe 15.

6.2.4 Résultats

On constate que les deux (2) alternatives diminuent le retard moyen absolu et le nombre de commandes refusées. La différence par rapport au scénario de base est significative (test de Kruskal-Wallis à 95 % d'intervalle de confiance). Les deux (2) alternatives ont des performances équivalentes (voir Figure 26 et Figure 27), une décision doit donc être prise au niveau financier et selon le taux d'utilisation des ressources.

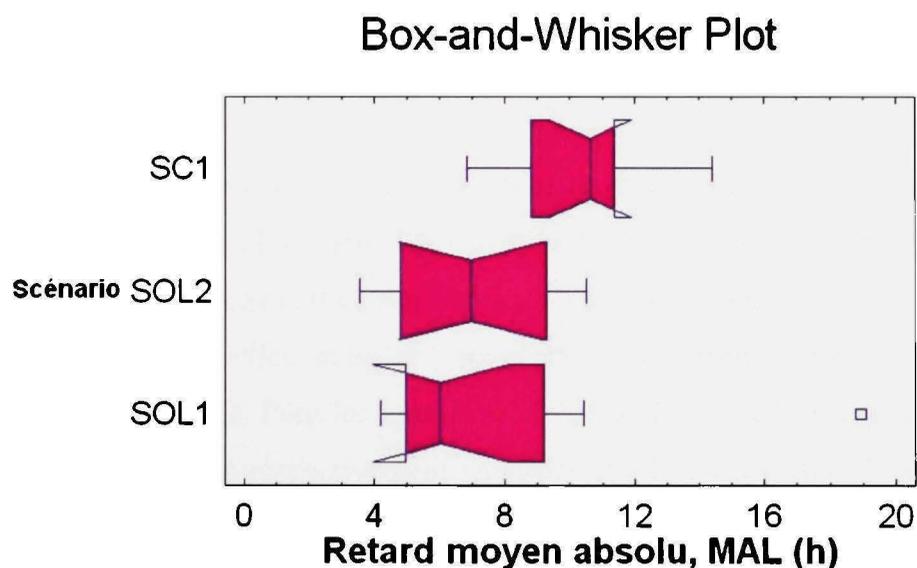


Figure 26 Performances MAL de SLK dans le système de réfection réel

Dans la situation actuelle, la performance MAL de SLK est de 10.57 h en moyenne. Dans les scénarios SOL1 et SOL2, elle est respectivement de 7.81 h et 6.98 h. Ces deux solutions représentent donc une amélioration de 26 % et 34 % de la performance de SLK.

Box-and-Whisker Plot

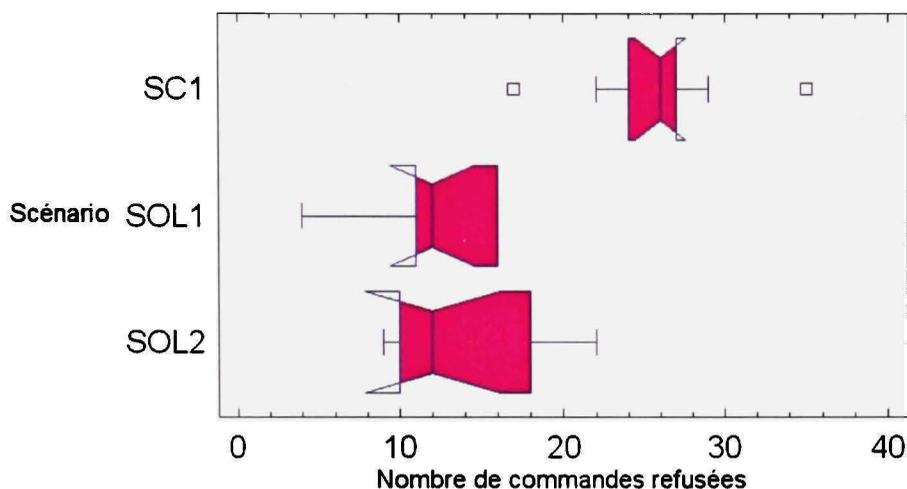


Figure 27 Nombre de commandes refusées dans le système de réfection réel

Le nombre moyen de commandes refusées dans la situation actuelle est de 25.78. Ce chiffre chute à 11.78 et 14.44 pour les solutions SOL1 et SOL2 respectivement. Ces chiffres ne sont pas directement comparables ; il faut tenir compte aussi du nombre de commandes traitées. En effet, puisque l'organisation de l'usine a changé, son taux de production a aussi changé. Pour les scénarios SC1, SOL1 et SOL2 le nombre moyen de commandes traitées sont respectivement 66, 76.3 et 71.5. En faisant le quotient des commandes refusées sur le nombre de commandes acceptées, on obtient : 0.39, 0.15 et 0.20 pour les scénarios SC1, SOL1 et SOL2 respectivement. C'est donc la première solution, l'ajout d'un (1) quart de travail par jour, qui est la meilleure. Autre remarque, la première solution est celle qui augmente le plus la productivité en permettant de traiter

le plus grand nombre de commandes. Le Tableau XXII présente les taux d'utilisation pour les trois (3) scénarios.

Tableau XXII

Taux d'utilisation (%) pour les trois scénarios

| Station | Scénario | | |
|---|----------|-------|-------|
| | SC1 | SOL1 | SOL2 |
| Désassemblage/assemblage | 30.8 | 23.4 | 16.55 |
| Nettoyage | 73 | 55.85 | 52.6 |
| Tests, des inspections et des tests non-destructifs | 61.9 | 47.2 | 33.45 |
| Réparation | 62 | 47.4 | 44.73 |
| Emballage | 2.4 | 1.8 | 1.3 |

La solution SOL1 paraît la meilleure solution, car elle est celle qui rentabilise le plus le matériel. Toutes les stations sont mieux utilisées lorsqu'on rajoute un deuxième quart de travail par jour.

Le dernier point qui permet de départager les deux (2) alternatives est le critère économique. Pour la première alternative, il s'agit d'embaucher deux (2) fois plus de personnel ou de faire travailler en heure supplémentaire le personnel existant afin d'assurer le fonctionnement du deuxième quart de travail par jour. Dans le cas de SOL2, il faut embaucher deux (2) fois du personnel et acheter l'équipement des postes supplémentaires pour que ces derniers soient fonctionnels en même temps que les installations actuelles. Par rapport à SOL1, SOL2 implique l'achat des nouveaux serveurs. Connaissant le coût unitaire des heures supplémentaires, le prix des serveurs et de leur amortissement, il serait possible de choisir une solution.

Concluons par le choix de la solution. Finalement, la meilleure solution pour le système de réfection réel est l'ajout d'un quart de travail par jour (scénario SOL1). Les raisons qui motivent ce choix sont les suivantes :

- a. Un nombre de refus de commandes plus petit ;
- b. Une meilleure productivité ;
- c. Une meilleure utilisation des machines.

6.2.5 Autres méthodes de planification

Les gestionnaires de l'entreprise ont proposé d'agrandir le système de réfection pour diminuer le nombre de retards. Proposons d'autres méthodes de planification qui pourraient réduire le nombre de retard. Changer de méthode planification pourrait éviter des achats dispendieux. Voici deux (2) méthodes paramétriques qui ne nécessitent aucun changement de la collecte de données du système de planification :

- a. La méthode CON.
- b. La méthode TIS.

Les comparaisons des trois (3) méthodes paramétriques d'assignation des dates d'exigibilité (CON, SLK, TIS) sont reportées aux Figure 28, Figure 29 et Figure 30.

Box-and-Whisker Plot

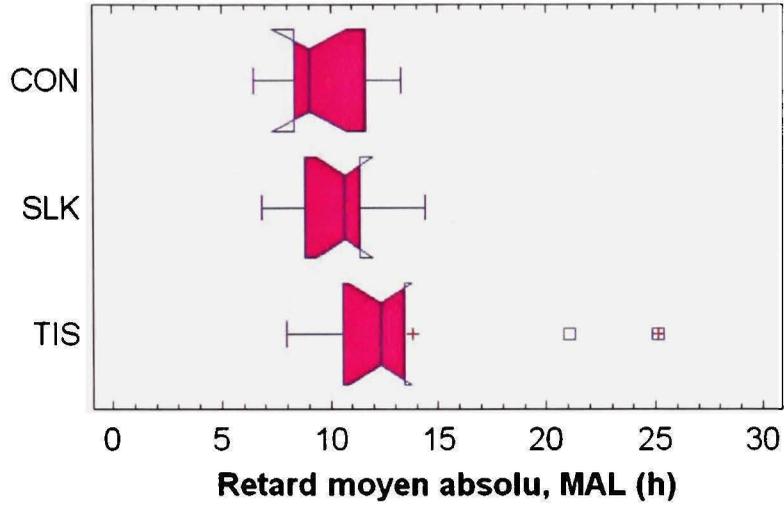


Figure 28 Retard moyen absolu (h) des méthodes de planification dans la situation actuelle du système de réfection (selon le scénario SC1)

Box-and-Whisker Plot

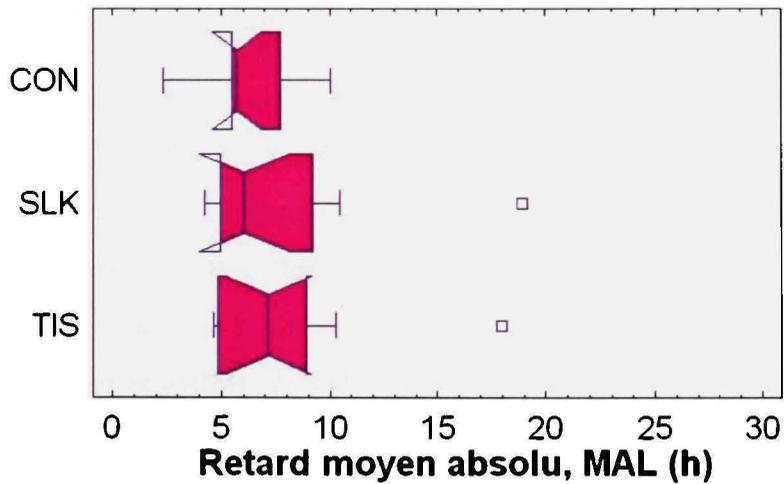


Figure 29 Retard moyen absolu (h) des méthodes de planification dans la solution 1 (scénario SOL1)

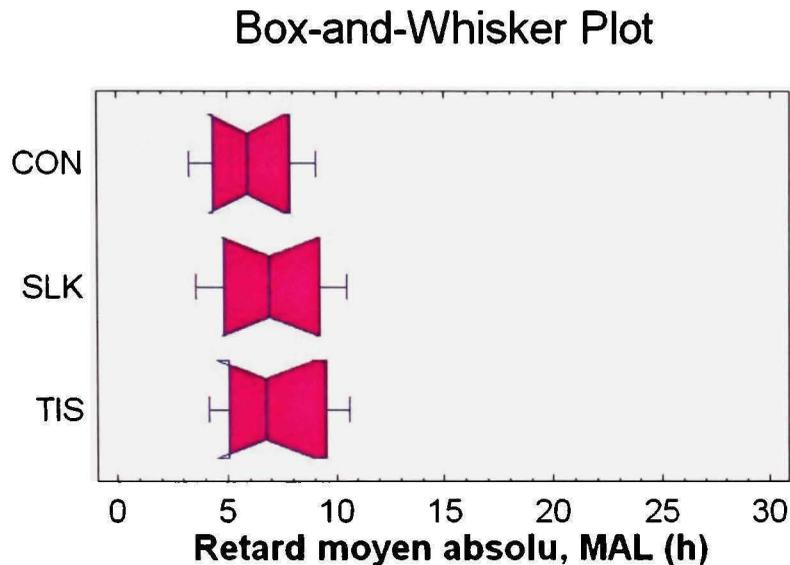


Figure 30 Retard moyen absolu (h) des méthodes de planification dans la solution 2 (scénario SOL2)

La méthode SLK est équivalente à la méthode TIS qui est toujours classée dernière. Cela confirme les observations précédentes (voir Chapitre 4). En effet, cette étude répète le fait que ces deux (2) méthodes performant encore de manière équivalente. À la vue des comparaisons dans les trois (3) situations, les méthodes SLK et TIS sont équivalentes à la méthode CON (CON est toujours la première méthode). Or, CON se base sur une formule qui n'utilise aucune information. Ceci implique que SLK et TIS ne considère pas l'attribut qui prédit correctement les dates d'exigibilité. SLK et TIS sont basées sur le temps de passage dans le système de la dernière commande. Cette donnée est un mauvais élément pour la planification de dates d'exigibilité dans le système réel de notre étude.

Pour les gestionnaires de cette entreprise nous conseillons donc d'utiliser la méthode CON qui performe de façon équivalente à TIS. La méthode CON n'utilise aucune information et est donc facilement implantable.

CONCLUSION

Ce projet a permis de développer une méthodologie afin de mieux comprendre les processus de désassemblage/assemblage (PD/A). Une bonne étude de la nomenclature aboutit à l'identification des pièces désassemblées et réassemblées. Les PD/A sont fréquents dans les environnements de réfection. Lors des études précédentes, les méthodes d'assignation des dates d'exigibilité (DDA) étaient étudiées selon le taux d'utilisation. Ce projet a poussé l'étude à un niveau de détails plus fins. Le nombre de serveurs en parallèle et le temps d'ouverture par jour ont été étudiés. Les expérimentations ont montré que des systèmes ayant des temps disponibles par jour (i.e. capacités) égaux ne requièrent pas les mêmes méthodes d'assignation des dates d'exigibilité. En effet, le nombre de serveurs en parallèle et le temps d'ouverture par jour ont des effets significatifs sur le choix d'une méthode de DDA.

De plus, le choix d'un critère de performance ou d'un type de commande n'affecte pas significativement le choix d'une méthode de DDA. En effet, le choix du retard moyen absolu (MAL) ou du retard moyen quadratique (MSL) comme critère de performance n'affecte pas le comportement des méthodes de DDA. En d'autres termes, ces critères sont équivalents. Pour les prochaines études, il serait judicieux d'intégrer le niveau de service. Celui-ci est pertinent car il permet de déduire les coûts de retard. Il modélise aussi la préoccupation majeure du secteur aéronautique : le niveau de service de la flotte d'avions. Les compagnies aériennes ou le secteur de la défense veulent assurer une certaine disponibilité de leurs avions.

En outre, dans ce projet, les méthodes ont été adaptées au cas de la réfection et ont considéré comme inconnue la charge de travail de la commande entrante. Pour remédier à ce problème, de nouvelles heuristiques ont été développées. Ceux-ci ont corrigé l'erreur commise en considérant les commandes sorties du système grâce à l'ajout d'un terme correctif. Ce terme illustre la variation de taux d'utilisation aux stations de

travail. Les méthodes ayant une signification réelle performant bien et montrent une meilleure stabilité que les méthodes usuelles i.e. elles performant convenablement quelle que soit l'organisation du système de réparation.

Si le système de réparation est très chargé (taux d'utilisation très élevé) la méthode JIS (*Jobs in System*) qui considère le nombre de pièces dans le système est à privilégier. Dans un centre de réparation peu chargé, les méthodes à considérer de préférence sont PUD (*Total work content Plus Utilization rates Difference*) et PUQ (*Total work content Plus Utilization rates Quotient*) qui sont des méthodes dérivées de TWK (*Total Work Content*) et corrigent les erreurs commises par un terme additif.

SLK (*Slack*) est une méthode qui performe de façon acceptable quelle que soit l'organisation du système de réparation considéré lors de ce projet. Dans le cas réel étudié, un système de réparation utilisant SLK, la meilleure solution pour diminuer le retard moyen absolu (MAL) est d'augmenter le nombre de quarts de travail par jour. Cependant, la relativement bonne performance de la méthode CON (*Constant*) dans tous les cas étudiés tend à souligner qu'aucun des facteurs explicatifs choisis n'est un très bon estimateur.

Une première amélioration de l'étude présente serait d'établir une modélisation encore plus proche de la réalité. Trois améliorations simples à mettre en place sont possibles. Tout d'abord, le quart de travail dans cette étude a une durée de 8 heures et n'a pas considéré les pauses. Il serait donc plus réaliste de modéliser le système de réparation avec des quarts de travail d'une durée de 7h30min. Ensuite, Les temps de réparation sont modélisés par une loi de distribution *Normale*. Les temps de réparation sont généralement tendance à être beaucoup plus long que prévu. Ils sont rarement en avance par rapport au temps d'opération prévu initialement. Cette distribution des temps pour les opérations de réparations pourrait donc être changée par une distribution *Lognormale*.

Enfin, lors de la définition du plan d'expérience le temps supplémentaire n'a pas été une option considéré afin d'augmenter le temps disponible pour traiter la commande.

Ce projet a mis en relief plusieurs problématiques qui devraient faire l'objet d'études futures. Une des perspectives suggérées par ce projet est l'étude exhaustive de tous les facteurs explicatifs des fluctuations du temps de traitement. Ceci a été mis en valeur par la relativement bonne performance de CON. Dans le contexte de la réfection, nous avons supposé inconnue la charge de travail à effectuer sur la commande entrante. De plus, nous avons utilisé les facteurs explicatifs usuels. Tout ceci incite à construire un nouveau projet qui étudierait une liste exhaustive de nouveaux facteurs explicatifs plus performants.

Les méthodes paramétriques de DDA mises en œuvre dans ce projet ne sont pas les uniques méthodes applicables à un environnement de réfection. D'autres types de méthodes de DDA doivent être étudiés dans les études futures afin de mesurer l'efficacité des méthodes présentées ci-dessus. Il est à noter que les méthodes paramétriques se révèlent être des outils simples et très efficaces.

Un paramètre (NNS, TOJ ou VAR) influence la méthode toujours de la même façon quel que soit les conditions : critère de performance et type de commandes. Par conséquent, le critère de performance et le type de commandes n'ont pas d'influence sur les conditions d'application des méthodes de DDA.

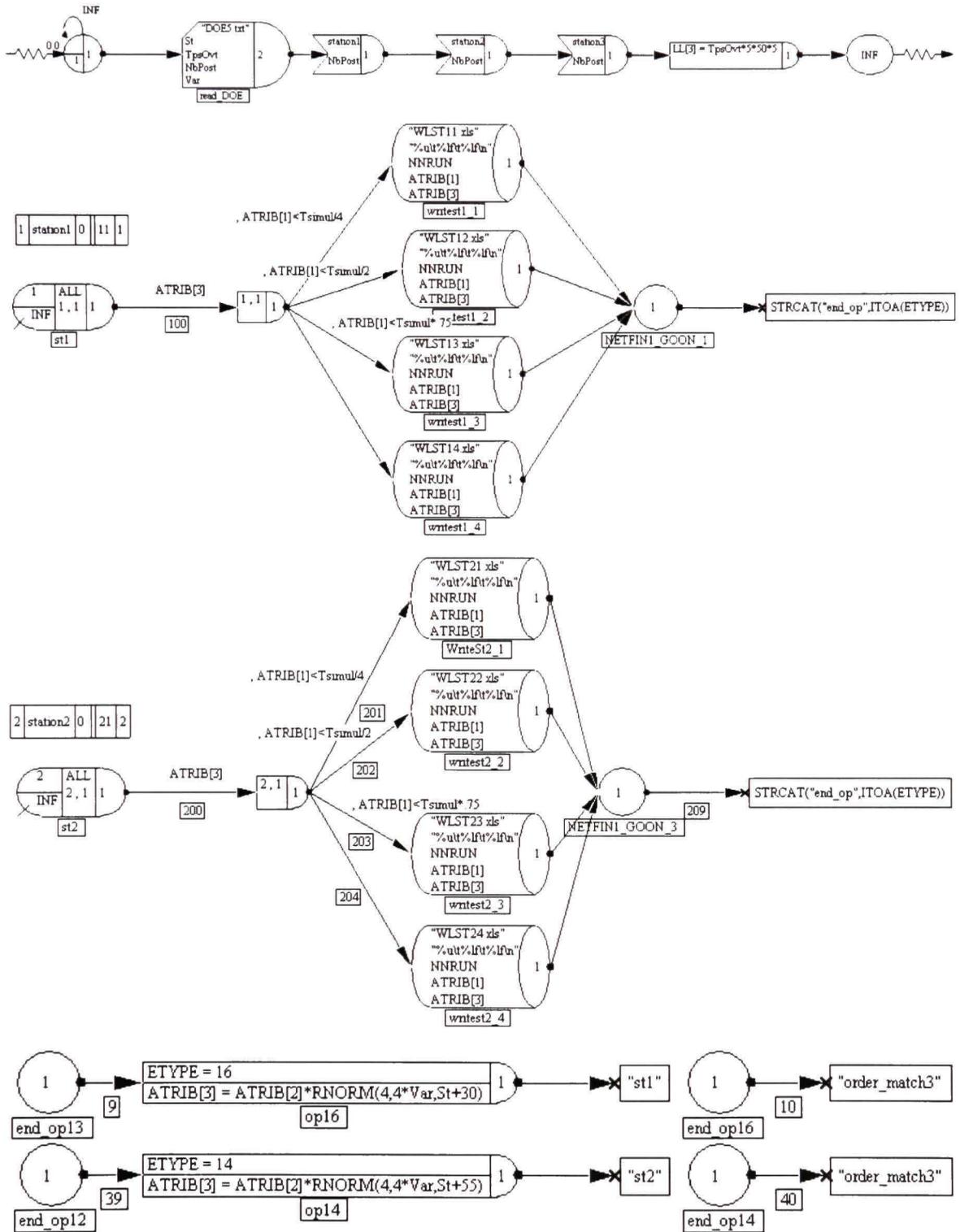
Aussi, il a été montré qu'une analyse de l'organisation du système de réfection était justifiée dans son influence sur le comportement des méthodes. Mais les résultats tentent à montrer que le choix des méthodes est moins nuancé. On distingue deux (2) cas pour le choix des méthodes : choisir JIS dans les systèmes chargés (temps d'ouverture par jour (TOJ) ou nombre de serveurs par station (NSS) faible) et choisir entre PUD et PUQ pour les systèmes peu chargés (TOJ ou NSS élevé). Les perspectives de cette analyse sont la construction d'un modèle de correction des méthodes de DDA. Le but est de concevoir le terme correctif approprié aux facteurs explicatifs sélectionnés.

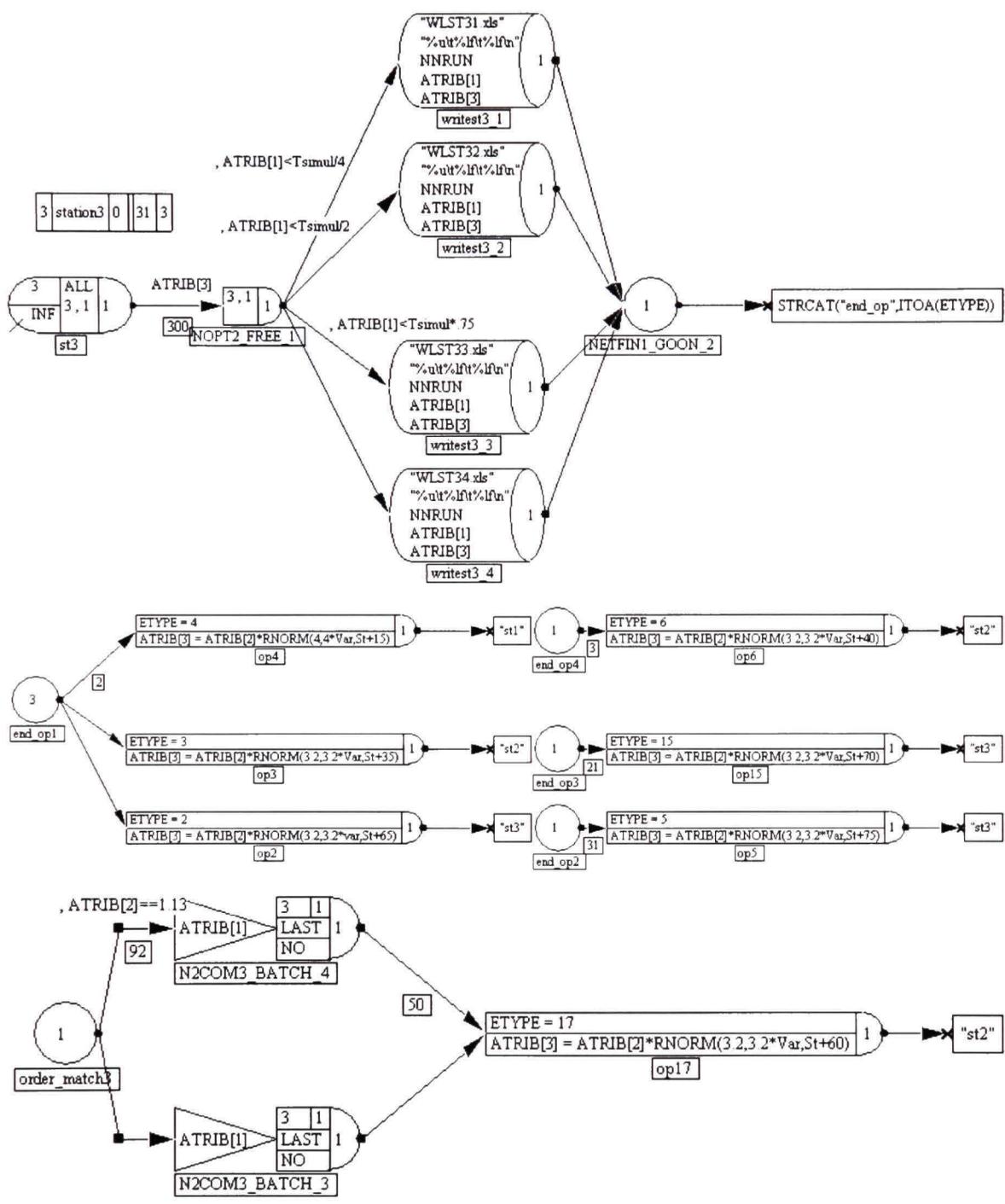
De plus, ce projet, en montrant le comportement des méthodes de DDA en fonction de l'organisation du système de réfection, pose la question d'un contrôle des méthodes de DDA en fonction de l'état du système de production. En effet, il a été vu que la meilleure méthode de planification paramétrique change suivant la charge du système. Il serait donc intéressant d'étudier la faisabilité et la conception d'un système qui ajusterait la méthode paramétrique de planification en fonction de la charge du système de production. Cela suppose l'élaboration d'un meilleur système de contrôle et de collecte d'informations capable de signaler à temps les changements d'état et de collecter les données appropriées à chaque état.

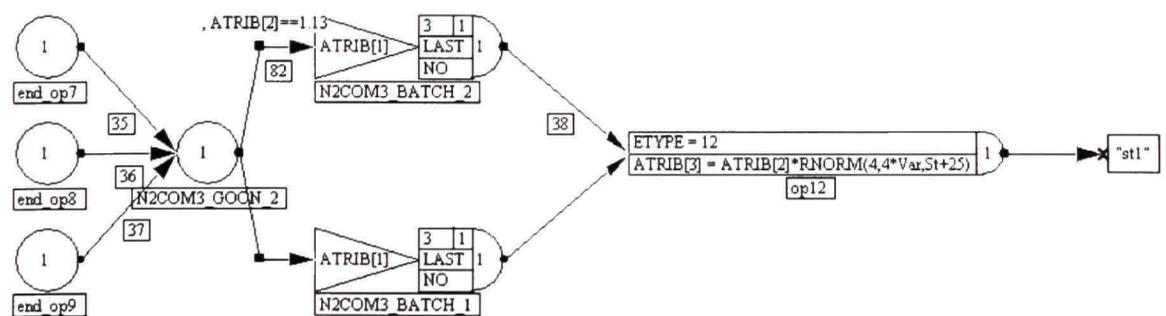
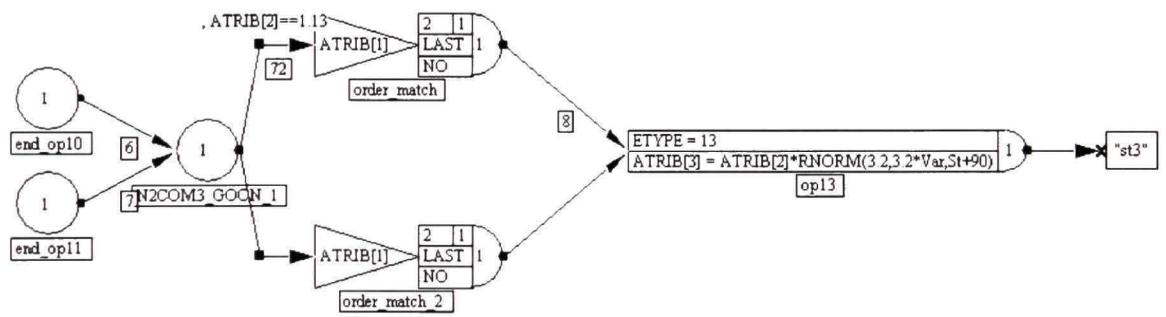
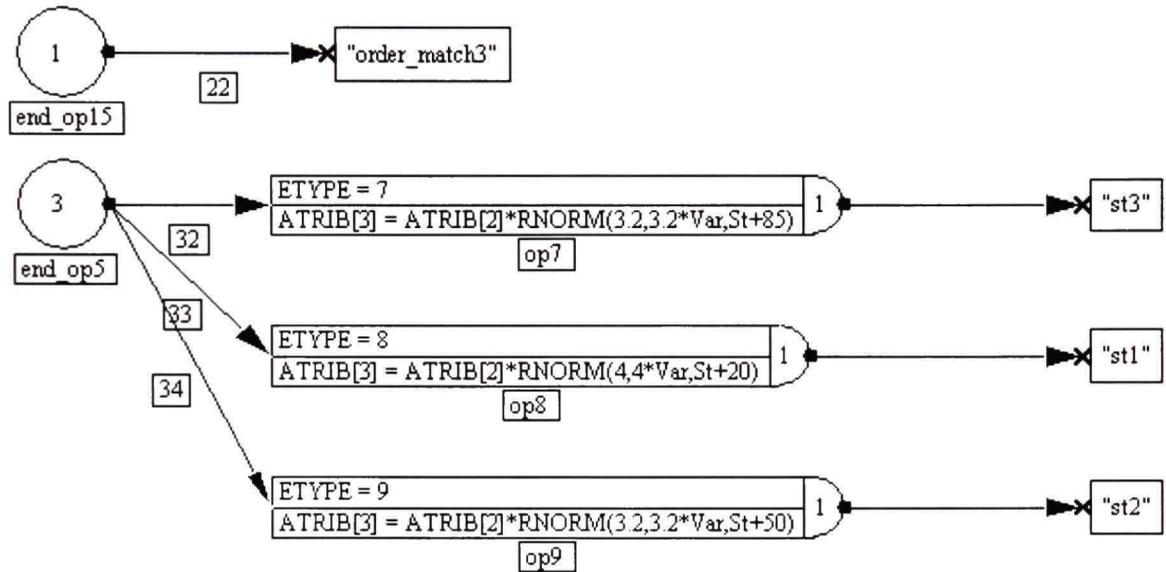
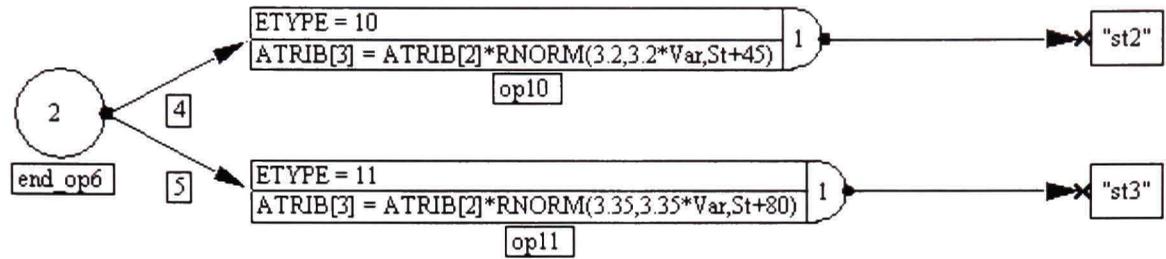
L'intérêt des études futures doit aussi être porté sur la considération des coûts d'adaptation du système de planification lors de la conception ou modification d'un système de réfection. En effet, l'organisation du système de réfection influence le choix de la méthode paramétrique de planification. La conception d'un système de production implique une nouvelle conception du système de collecte de données pour la planification. Les études futures doivent donc se poser la question de savoir s'il est rentable d'implanter une nouvelle méthode de planification si l'organisation de l'usine est modifiée.

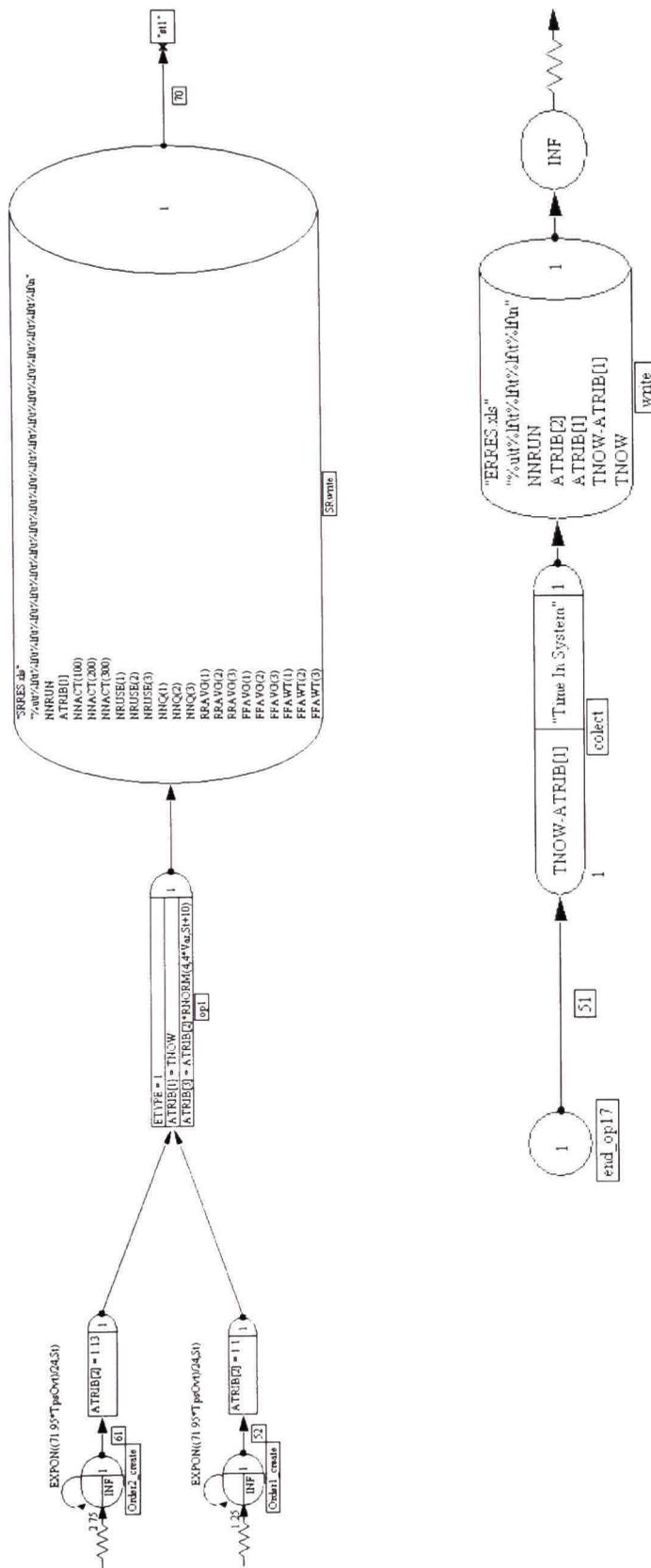
ANNEXE 1

Réseau du modèle de simulation pour la cinquième réplique









ANNEXE 2

Fichier de contrôle du Modèle de simulation

```

GEN,"Article","Remanufacturing Shop",13/12/2006,15,YES,YES;
LIMITS,1,3,,5;
EQUIVALENCE,{{St,LL[0]},{TpsOvt,LL[1]},{NbPost,LL[2]},{Var,XX[1]}};
EQUIVALENCE,{{Tsimul,34500}};
NET;
INITIALIZE,0.0,Tsimul,YES,,NO;
MONTR,CLEAR,0;
SEEDS,{{,1,YES},{,2,YES},{,3,YES},{,4,YES},{,5,YES},{,11,YES},{,12,YES},{,13,YES},{,14,YES},{,15,YES}};
SEEDS,{{,21,YES},{,22,YES},{,23,YES},{,24,YES},{,25,YES},{,31,YES},{,32,YES},{,33,YES},{,34,YES},{,35,YES}};
SEEDS,{{,41,YES},{,42,YES},{,43,YES},{,44,YES},{,45,YES},{,51,YES},{,52,YES},{,53,YES},{,54,YES},{,55,YES}};
SEEDS,{{,61,YES},{,62,YES},{,63,YES},{,64,YES},{,65,YES},{,71,YES},{,72,YES},{,73,YES},{,74,YES},{,75,YES}};
SEEDS,{{,81,YES},{,82,YES},{,83,YES},{,84,YES},{,85,YES},{,91,YES},{,92,YES},{,93,YES},{,94,YES},{,95,YES}};
SEEDS,{{,6,YES},{,7,YES},{,8,YES},{,9,YES},{,10,YES},{,16,YES},{,17,YES},{,18,YES},{,19,YES},{,20,YES}};
SEEDS,{{,26,YES},{,27,YES},{,28,YES},{,29,YES},{,30,YES},{,36,YES},{,37,YES},{,38,YES},{,39,YES},{,40,YES}};
SEEDS,{{,46,YES},{,47,YES},{,48,YES},{,49,YES},{,50,YES},{,56,YES},{,57,YES},{,58,YES},{,59,YES},{,60,YES}};
SEEDS,{{,66,YES},{,67,YES},{,68,YES},{,69,YES},{,70,YES},{,76,YES},{,77,YES},{,78,YES},{,79,YES},{,80,YES}};
SEEDS,{{,86,YES},{,87,YES},{,88,YES},{,89,YES},{,90,YES}};
PRIORITY,{{1,FIFO},{2,FIFO},{3,FIFO}};
FIN;

```

ANNEXE 3

Macro VBA Excel optimisant les performances des méthodes de DDA

```

Public WB As Workbook
Private Sub BoutonCentral_Click()

Rem
*****
Rem Optimisation de la première réplication (Run 1 Optimization)
Rem
*****

Set WB = Application.Workbooks.Open("C:\Documents and Settings\ghourmilouge\Mes
documents\guillaume\run1\1_1Src.xls")
Call optimiseClasseur
Set WB = Application.Workbooks.Open("C:\Documents and Settings\ghourmilouge\Mes
documents\guillaume\run1\1_2Src.xls")
Call optimiseClasseur

Set WB = Application.Workbooks.Open("C:\Documents and Settings\ghourmilouge\Mes
documents\guillaume\run1\2_1Src.xls")
Call optimiseClasseur
Set WB = Application.Workbooks.Open("C:\Documents and Settings\ghourmilouge\Mes
documents\guillaume\run1\2_2Src.xls")
Call optimiseClasseur

Set WB = Application.Workbooks.Open("C:\Documents and Settings\ghourmilouge\Mes
documents\guillaume\run1\3_1Src.xls")
Call optimiseClasseur
Set WB = Application.Workbooks.Open("C:\Documents and Settings\ghourmilouge\Mes
documents\guillaume\run1\3_2Src.xls")
Call optimiseClasseur

Set WB = Application.Workbooks.Open("C:\Documents and Settings\ghourmilouge\Mes
documents\guillaume\run1\4_1Src.xls")
Call optimiseClasseur
Set WB = Application.Workbooks.Open("C:\Documents and Settings\ghourmilouge\Mes
documents\guillaume\run1\4_2Src.xls")
Call optimiseClasseur

Set WB = Application.Workbooks.Open("C:\Documents and Settings\ghourmilouge\Mes
documents\guillaume\run1\5_1Src.xls")
Call optimiseClasseur
Set WB = Application.Workbooks.Open("C:\Documents and Settings\ghourmilouge\Mes
documents\guillaume\run1\5_2Src.xls")
Call optimiseClasseur

Set WB = Application.Workbooks.Open("C:\Documents and Settings\ghourmilouge\Mes
documents\guillaume\run1\6_1Src.xls")
Call optimiseClasseur
Set WB = Application.Workbooks.Open("C:\Documents and Settings\ghourmilouge\Mes
documents\guillaume\run1\6_2Src.xls")
Call optimiseClasseur

Set WB = Application.Workbooks.Open("C:\Documents and Settings\ghourmilouge\Mes
documents\guillaume\run1\7_1Src.xls")
Call optimiseClasseur
Set WB = Application.Workbooks.Open("C:\Documents and Settings\ghourmilouge\Mes
documents\guillaume\run1\7_2Src.xls")
Call optimiseClasseur

Set WB = Application.Workbooks.Open("C:\Documents and Settings\ghourmilouge\Mes
documents\guillaume\run1\8_1Src.xls")
Call optimiseClasseur
Set WB = Application.Workbooks.Open("C:\Documents and Settings\ghourmilouge\Mes
documents\guillaume\run1\8_2Src.xls")
Call optimiseClasseur

Set WB = Application.Workbooks.Open("C:\Documents and Settings\ghourmilouge\Mes
documents\guillaume\run1\9_1Src.xls")

```

```

Call optimiseClasseur
Set WB = Application.Workbooks.Open("C:\Documents and Settings\ghourmilougue\Mes
documents\guillaume\run1\9_2Src.xls")
Call optimiseClasseur

Set WB = Application.Workbooks.Open("C:\Documents and Settings\ghourmilougue\Mes
documents\guillaume\run1\10_1Src.xls")
Call optimiseClasseur
Set WB = Application.Workbooks.Open("C:\Documents and Settings\ghourmilougue\Mes
documents\guillaume\run1\10_2Src.xls")
Call optimiseClasseur

Set WB = Application.Workbooks.Open("C:\Documents and Settings\ghourmilougue\Mes
documents\guillaume\run1\11_1Src.xls")
Call optimiseClasseur
Set WB = Application.Workbooks.Open("C:\Documents and Settings\ghourmilougue\Mes
documents\guillaume\run1\11_2Src.xls")
Call optimiseClasseur

Set WB = Application.Workbooks.Open("C:\Documents and Settings\ghourmilougue\Mes
documents\guillaume\run1\12_1Src.xls")
Call optimiseClasseur
Set WB = Application.Workbooks.Open("C:\Documents and Settings\ghourmilougue\Mes
documents\guillaume\run1\12_2Src.xls")
Call optimiseClasseur

Set WB = Application.Workbooks.Open("C:\Documents and Settings\ghourmilougue\Mes
documents\guillaume\run1\13_1Src.xls")
Call optimiseClasseur
Set WB = Application.Workbooks.Open("C:\Documents and Settings\ghourmilougue\Mes
documents\guillaume\run1\13_2Src.xls")
Call optimiseClasseur

Set WB = Application.Workbooks.Open("C:\Documents and Settings\ghourmilougue\Mes
documents\guillaume\run1\14_1Src.xls")
Call optimiseClasseur
Set WB = Application.Workbooks.Open("C:\Documents and Settings\ghourmilougue\Mes
documents\guillaume\run1\14_2Src.xls")
Call optimiseClasseur

Set WB = Application.Workbooks.Open("C:\Documents and Settings\ghourmilougue\Mes
documents\guillaume\run1\15_1Src.xls")
Call optimiseClasseur
Set WB = Application.Workbooks.Open("C:\Documents and Settings\ghourmilougue\Mes
documents\guillaume\run1\15_2Src.xls")
Call optimiseClasseur

Rem
*****
Rem Optimisation de la deuxième répllication (Run 2 Optimization)
Rem
*****

Set WB = Application.Workbooks.Open("C:\Documents and Settings\ghourmilougue\Mes
documents\guillaume\run2\1_1.xls")
Call optimiseClasseur
Set WB = Application.Workbooks.Open("C:\Documents and Settings\ghourmilougue\Mes
documents\guillaume\run2\1_2.xls")
Call optimiseClasseur

Set WB = Application.Workbooks.Open("C:\Documents and Settings\ghourmilougue\Mes
documents\guillaume\run2\2_1.xls")
Call optimiseClasseur
Set WB = Application.Workbooks.Open("C:\Documents and Settings\ghourmilougue\Mes
documents\guillaume\run2\2_2.xls")
Call optimiseClasseur

```



```

Set WB = Application.Workbooks.Open("C:\Documents and Settings\ghourmilougue\Mes
documents\guillaume\run2\12_2.xls")
Call optimiseClasseur

Set WB = Application.Workbooks.Open("C:\Documents and Settings\ghourmilougue\Mes
documents\guillaume\run2\13_1.xls")
Call optimiseClasseur
Set WB = Application.Workbooks.Open("C:\Documents and Settings\ghourmilougue\Mes
documents\guillaume\run2\13_2.xls")
Call optimiseClasseur

Set WB = Application.Workbooks.Open("C:\Documents and Settings\ghourmilougue\Mes
documents\guillaume\run2\14_1.xls")
Call optimiseClasseur
Set WB = Application.Workbooks.Open("C:\Documents and Settings\ghourmilougue\Mes
documents\guillaume\run2\14_2.xls")
Call optimiseClasseur

Set WB = Application.Workbooks.Open("C:\Documents and Settings\ghourmilougue\Mes
documents\guillaume\run2\15_1.xls")
Call optimiseClasseur
Set WB = Application.Workbooks.Open("C:\Documents and Settings\ghourmilougue\Mes
documents\guillaume\run2\15_2.xls")
Call optimiseClasseur

Rem
*****
Rem Optimisation de la troisième réplique (Run 3 Optimization)
Rem
*****

Set WB = Application.Workbooks.Open("C:\Documents and Settings\ghourmilougue\Mes
documents\guillaume\run3\1_1.xls")
Call optimiseClasseur
Set WB = Application.Workbooks.Open("C:\Documents and Settings\ghourmilougue\Mes
documents\guillaume\run3\1_2.xls")
Call optimiseClasseur

Set WB = Application.Workbooks.Open("C:\Documents and Settings\ghourmilougue\Mes
documents\guillaume\run3\2_1.xls")
Call optimiseClasseur
Set WB = Application.Workbooks.Open("C:\Documents and Settings\ghourmilougue\Mes
documents\guillaume\run3\2_2.xls")
Call optimiseClasseur

Set WB = Application.Workbooks.Open("C:\Documents and Settings\ghourmilougue\Mes
documents\guillaume\run3\3_1.xls")
Call optimiseClasseur
Set WB = Application.Workbooks.Open("C:\Documents and Settings\ghourmilougue\Mes
documents\guillaume\run3\3_2.xls")
Call optimiseClasseur

Set WB = Application.Workbooks.Open("C:\Documents and Settings\ghourmilougue\Mes
documents\guillaume\run3\4_1.xls")
Call optimiseClasseur
Set WB = Application.Workbooks.Open("C:\Documents and Settings\ghourmilougue\Mes
documents\guillaume\run3\4_2.xls")
Call optimiseClasseur

Set WB = Application.Workbooks.Open("C:\Documents and Settings\ghourmilougue\Mes
documents\guillaume\run3\5_1.xls")
Call optimiseClasseur
Set WB = Application.Workbooks.Open("C:\Documents and Settings\ghourmilougue\Mes
documents\guillaume\run3\5_2.xls")
Call optimiseClasseur

```



```
Set WB = Application.Workbooks.Open("C:\Documents and Settings\ghourmilougue\Mes
documents\guillaume\run3\15_2.xls")
Call optimiseClasseur

Rem
*****
*****
Rem Optimisation de la quatrième répllication (Run 4 Optimization)
Rem
*****
*****

Set WB = Application.Workbooks.Open("C:\Documents and Settings\ghourmilougue\Mes
documents\guillaume\run4\1_1.xls")
Call optimiseClasseur
Set WB = Application.Workbooks.Open("C:\Documents and Settings\ghourmilougue\Mes
documents\guillaume\run4\1_2.xls")
Call optimiseClasseur

Set WB = Application.Workbooks.Open("C:\Documents and Settings\ghourmilougue\Mes
documents\guillaume\run4\2_1.xls")
Call optimiseClasseur
Set WB = Application.Workbooks.Open("C:\Documents and Settings\ghourmilougue\Mes
documents\guillaume\run4\2_2.xls")
Call optimiseClasseur

Set WB = Application.Workbooks.Open("C:\Documents and Settings\ghourmilougue\Mes
documents\guillaume\run4\3_1.xls")
Call optimiseClasseur
Set WB = Application.Workbooks.Open("C:\Documents and Settings\ghourmilougue\Mes
documents\guillaume\run4\3_2.xls")
Call optimiseClasseur

Set WB = Application.Workbooks.Open("C:\Documents and Settings\ghourmilougue\Mes
documents\guillaume\run4\4_1.xls")
Call optimiseClasseur
Set WB = Application.Workbooks.Open("C:\Documents and Settings\ghourmilougue\Mes
documents\guillaume\run4\4_2.xls")
Call optimiseClasseur

Set WB = Application.Workbooks.Open("C:\Documents and Settings\ghourmilougue\Mes
documents\guillaume\run4\5_1.xls")
Call optimiseClasseur
Set WB = Application.Workbooks.Open("C:\Documents and Settings\ghourmilougue\Mes
documents\guillaume\run4\5_2.xls")
Call optimiseClasseur

Set WB = Application.Workbooks.Open("C:\Documents and Settings\ghourmilougue\Mes
documents\guillaume\run4\6_1.xls")
Call optimiseClasseur
Set WB = Application.Workbooks.Open("C:\Documents and Settings\ghourmilougue\Mes
documents\guillaume\run4\6_2.xls")
Call optimiseClasseur

Set WB = Application.Workbooks.Open("C:\Documents and Settings\ghourmilougue\Mes
documents\guillaume\run4\7_1.xls")
Call optimiseClasseur
Set WB = Application.Workbooks.Open("C:\Documents and Settings\ghourmilougue\Mes
documents\guillaume\run4\7_2.xls")
Call optimiseClasseur

Set WB = Application.Workbooks.Open("C:\Documents and Settings\ghourmilougue\Mes
documents\guillaume\run4\8_1.xls")
Call optimiseClasseur
Set WB = Application.Workbooks.Open("C:\Documents and Settings\ghourmilougue\Mes
documents\guillaume\run4\8_2.xls")
Call optimiseClasseur
```

```

Set WB = Application.Workbooks.Open("C:\Documents and Settings\ghourmilouge\Mes
documents\guillaume\run4\9_1.xls")
Call optimiseClasseur
Set WB = Application.Workbooks.Open("C:\Documents and Settings\ghourmilouge\Mes
documents\guillaume\run4\9_2.xls")
Call optimiseClasseur

Set WB = Application.Workbooks.Open("C:\Documents and Settings\ghourmilouge\Mes
documents\guillaume\run4\10_1.xls")
Call optimiseClasseur
Set WB = Application.Workbooks.Open("C:\Documents and Settings\ghourmilouge\Mes
documents\guillaume\run4\10_2.xls")
Call optimiseClasseur

Set WB = Application.Workbooks.Open("C:\Documents and Settings\ghourmilouge\Mes
documents\guillaume\run4\11_1.xls")
Call optimiseClasseur
Set WB = Application.Workbooks.Open("C:\Documents and Settings\ghourmilouge\Mes
documents\guillaume\run4\11_2.xls")
Call optimiseClasseur

Set WB = Application.Workbooks.Open("C:\Documents and Settings\ghourmilouge\Mes
documents\guillaume\run4\12_1.xls")
Call optimiseClasseur
Set WB = Application.Workbooks.Open("C:\Documents and Settings\ghourmilouge\Mes
documents\guillaume\run4\12_2.xls")
Call optimiseClasseur

Set WB = Application.Workbooks.Open("C:\Documents and Settings\ghourmilouge\Mes
documents\guillaume\run4\13_1.xls")
Call optimiseClasseur
Set WB = Application.Workbooks.Open("C:\Documents and Settings\ghourmilouge\Mes
documents\guillaume\run4\13_2.xls")
Call optimiseClasseur

Set WB = Application.Workbooks.Open("C:\Documents and Settings\ghourmilouge\Mes
documents\guillaume\run4\14_1.xls")
Call optimiseClasseur
Set WB = Application.Workbooks.Open("C:\Documents and Settings\ghourmilouge\Mes
documents\guillaume\run4\14_2.xls")
Call optimiseClasseur

Set WB = Application.Workbooks.Open("C:\Documents and Settings\ghourmilouge\Mes
documents\guillaume\run4\15_1.xls")
Call optimiseClasseur
Set WB = Application.Workbooks.Open("C:\Documents and Settings\ghourmilouge\Mes
documents\guillaume\run4\15_2.xls")
Call optimiseClasseur

Rem
*****
Rem Optimisation de la cinquième réplcation (Run 5 Optimization)
Rem
*****

Set WB = Application.Workbooks.Open("C:\Documents and Settings\ghourmilouge\Mes
documents\guillaume\run5\1_1.xls")
Call optimiseClasseur
Set WB = Application.Workbooks.Open("C:\Documents and Settings\ghourmilouge\Mes
documents\guillaume\run5\1_2.xls")
Call optimiseClasseur

Set WB = Application.Workbooks.Open("C:\Documents and Settings\ghourmilouge\Mes
documents\guillaume\run5\2_1.xls")
Call optimiseClasseur

```



```

Set WB = Application.Workbooks.Open("C:\Documents and Settings\ghourmilougue\Mes
documents\guillaume\run5\12_1.xls")
Call optimiseClasseur
Set WB = Application.Workbooks.Open("C:\Documents and Settings\ghourmilougue\Mes
documents\guillaume\run5\12_2.xls")
Call optimiseClasseur

Set WB = Application.Workbooks.Open("C:\Documents and Settings\ghourmilougue\Mes
documents\guillaume\run5\13_1.xls")
Call optimiseClasseur
Set WB = Application.Workbooks.Open("C:\Documents and Settings\ghourmilougue\Mes
documents\guillaume\run5\13_2.xls")
Call optimiseClasseur

Set WB = Application.Workbooks.Open("C:\Documents and Settings\ghourmilougue\Mes
documents\guillaume\run5\14_1.xls")
Call optimiseClasseur
Set WB = Application.Workbooks.Open("C:\Documents and Settings\ghourmilougue\Mes
documents\guillaume\run5\14_2.xls")
Call optimiseClasseur

Set WB = Application.Workbooks.Open("C:\Documents and Settings\ghourmilougue\Mes
documents\guillaume\run5\15_1.xls")
Call optimiseClasseur
Set WB = Application.Workbooks.Open("C:\Documents and Settings\ghourmilougue\Mes
documents\guillaume\run5\15_2.xls")
Call optimiseClasseur

End Sub

Rem la procedure optimise le classeur
Rem cette sub exécute successivement le solveur de chaque feuille
Rem Le classeur est ensuite fermé en enregistrant les modifications
Private Sub optimiseClasseur()
Dim WS As Worksheet

Set WS = Worksheets("CON_MAL")
WS.Activate
WS.Cells(2950, 1).Value = 0
SolverReset
SolverOk SetCell:=Range("F2950"), _
    MaxMinVal:=2, _
    ByChange:=Range("A2950")
SolverSolve UserFinish:=True

Set WS = Worksheets("CON_MSL")
WS.Activate
WS.Cells(2950, 1).Value = 0
SolverReset
SolverOk SetCell:=Range("F2950"), _
    MaxMinVal:=2, _
    ByChange:=Range("A2950")
SolverSolve UserFinish:=True

Set WS = Worksheets("JIS_MAL")
WS.Activate
WS.Cells(2950, 1).Value = 0
SolverReset
SolverOk SetCell:=Range("M2950"), _
    MaxMinVal:=2, _
    ByChange:=Range("A2950")
SolverSolve UserFinish:=True

Set WS = Worksheets("JIS_MSL")
WS.Activate

```

```

WS.Cells(2950, 1).Value = 0
SolverReset
SolverOk SetCell:=Range("M2950"), _
    MaxMinVal:=2, _
    ByChange:=Range("A2950")
SolverSolve UserFinish:=True

Set WS = Worksheets("JIQ_MAL")
WS.Activate
WS.Cells(2950, 1).Value = 0
SolverReset
SolverOk SetCell:=Range("J2950"), _
    MaxMinVal:=2, _
    ByChange:=Range("A2950")
SolverSolve UserFinish:=True

Set WS = Worksheets("JIQ_MSL")
WS.Activate
WS.Cells(2950, 1).Value = 0
SolverReset
SolverOk SetCell:=Range("J2950"), _
    MaxMinVal:=2, _
    ByChange:=Range("A2950")
SolverSolve UserFinish:=True

Set WS = Worksheets("SLK_MAL")
WS.Activate
WS.Cells(2950, 1).Value = 0
SolverReset
SolverOk SetCell:=Range("H2950"), _
    MaxMinVal:=2, _
    ByChange:=Range("A2950")
SolverSolve UserFinish:=True

Set WS = Worksheets("SLK_MSL")
WS.Activate
WS.Cells(2950, 1).Value = 0
SolverReset
SolverOk SetCell:=Range("H2950"), _
    MaxMinVal:=2, _
    ByChange:=Range("A2950")
SolverSolve UserFinish:=True

Set WS = Worksheets("MSLK_MAL")
WS.Activate
WS.Cells(2950, 1).Value = 0
SolverReset
SolverOk SetCell:=Range("H2950"), _
    MaxMinVal:=2, _
    ByChange:=Range("A2950")
SolverSolve UserFinish:=True

Set WS = Worksheets("MSLK_MSL")
WS.Activate
WS.Cells(2950, 1).Value = 0
SolverReset
SolverOk SetCell:=Range("H2950"), _
    MaxMinVal:=2, _
    ByChange:=Range("A2950")
SolverSolve UserFinish:=True

Set WS = Worksheets("TWK_MAL")
WS.Activate
WS.Cells(2950, 1).Value = 0
SolverReset
SolverOk SetCell:=Range("K2950"), _
    MaxMinVal:=2, _

```

```

        ByChange:=Range("A2950")
SolverSolve UserFinish:=True

Set WS = Worksheets("TWK_MSL")
WS.Activate
WS.Cells(2950, 1).Value = 0
SolverReset
SolverOk SetCell:=Range("K2950"), _
    MaxMinVal:=2, _
    ByChange:=Range("A2950")
SolverSolve UserFinish:=True

Set WS = Worksheets("MTWK_MAL")
WS.Activate
WS.Cells(2950, 1).Value = 0
SolverReset
SolverOk SetCell:=Range("K2950"), _
    MaxMinVal:=2, _
    ByChange:=Range("A2950")
SolverSolve UserFinish:=True

Set WS = Worksheets("MTWK_MSL")
WS.Activate
WS.Cells(2950, 1).Value = 0
SolverReset
SolverOk SetCell:=Range("K2950"), _
    MaxMinVal:=2, _
    ByChange:=Range("A2950")
SolverSolve UserFinish:=True

'new DDA methods

Set WS = Worksheets("TUD_MAL")
WS.Activate
WS.Cells(2950, 1).Value = 0
SolverReset
SolverOk SetCell:=Range("O2950"), _
    MaxMinVal:=2, _
    ByChange:=Range("A2950")
SolverSolve UserFinish:=True

Set WS = Worksheets("TUD_MSL")
WS.Activate
WS.Cells(2950, 1).Value = 0
SolverReset
SolverOk SetCell:=Range("O2950"), _
    MaxMinVal:=2, _
    ByChange:=Range("A2950")
SolverSolve UserFinish:=True

Set WS = Worksheets("PUD_MAL")
WS.Activate
WS.Cells(2950, 1).Value = 0
WS.Cells(2951, 1).Value = 0
SolverReset
SolverOk SetCell:=Range("O2950"), _
    MaxMinVal:=2, _
    ByChange:=Range("A2950:A2951")
SolverSolve UserFinish:=True

Set WS = Worksheets("PUD_MSL")
WS.Activate
WS.Cells(2950, 1).Value = 0
WS.Cells(2951, 1).Value = 0
SolverReset
SolverOk SetCell:=Range("O2950"), _
    MaxMinVal:=2, _

```

```

        ByChange:=Range("A2950:A2951")
SolverSolve UserFinish:=True

Set WS = Worksheets("TUQ_MAL")
WS.Activate
WS.Cells(2950, 1).Value = 0
SolverReset
SolverOk SetCell:=Range("O2950"), _
    MaxMinVal:=2, _
    ByChange:=Range("A2950")
SolverSolve UserFinish:=True

Set WS = Worksheets("TUQ_MSL")
WS.Activate
WS.Cells(2950, 1).Value = 0
SolverReset
SolverOk SetCell:=Range("O2950"), _
    MaxMinVal:=2, _
    ByChange:=Range("A2950")
SolverSolve UserFinish:=True

Set WS = Worksheets("PUQ_MAL")
WS.Activate
WS.Cells(2950, 1).Value = 0
WS.Cells(2951, 1).Value = 0
SolverReset
SolverOk SetCell:=Range("O2950"), _
    MaxMinVal:=2, _
    ByChange:=Range("A2950:A2951")
SolverSolve UserFinish:=True

Set WS = Worksheets("PUQ_MSL")
WS.Activate
WS.Cells(2950, 1).Value = 0
WS.Cells(2951, 1).Value = 0
SolverReset
SolverOk SetCell:=Range("O2950"), _
    MaxMinVal:=2, _
    ByChange:=Range("A2950:A2951")
SolverSolve UserFinish:=True

Set WS = Worksheets("TIS_MAL")
WS.Activate
WS.Cells(2950, 1).Value = 0
SolverReset
SolverOk SetCell:=Range("H2950"), _
    MaxMinVal:=2, _
    ByChange:=Range("A2950")
SolverSolve UserFinish:=True

Set WS = Worksheets("TIS_MSL")
WS.Activate
WS.Cells(2950, 1).Value = 0
SolverReset
SolverOk SetCell:=Range("H2950"), _
    MaxMinVal:=2, _
    ByChange:=Range("A2950")
SolverSolve UserFinish:=True

Set WS = Worksheets("MTIS_MAL")
WS.Activate
WS.Cells(2950, 1).Value = 0
SolverReset
SolverOk SetCell:=Range("H2950"), _
    MaxMinVal:=2, _
    ByChange:=Range("A2950")
SolverSolve UserFinish:=True

```

```
Set WS = Worksheets("MTIS_MSL")
WS.Activate
WS.Cells(2950, 1).Value = 0
SolverReset
SolverOk SetCell:=Range("H2950"), _
    MaxMinVal:=2, _
    ByChange:=Range("A2950")
SolverSolve UserFinish:=True

Rem on ferme le classeur actif
ActiveWorkbook.Close True

End Sub
```

ANNEXE 4

Tests statistiques

Cette annexe décrit quatre (4) tests statistiques: le test W de Mann-Whitney, le module « *variance check* » de Statgraphics® Plus5, le test de Kruskal-Wallis sur les moyennes, et la méthode graphique des boîtes à moustaches avec encoches.

A. Test non-paramétrique, W de Mann-Whitney

Ce test est aussi désigné comme le test- U . Dans le cas où les hypothèses de normalité et d'homoscédasticité n'étaient pas vérifiées, nous aurions mis en place un test non-paramétrique (qui ne fait pas intervenir la loi de distribution des données de la population) pour comparer les populations dont sont issus les échantillons. La moyenne est fortement influencée par ces valeurs extrêmes. Par conséquent, le paramètre de comparaison utilisé est la médiane plutôt que la moyenne. La médiane est la valeur située au milieu d'une série de données triées par ordre de grandeur afin de séparer cette série en deux (2) parties d'effectif égal. L'avantage de la médiane est qu'elle n'est pas ou peu influencée par les valeurs extrêmes. Un test de Mann-Whitney est un test non-paramétrique qui utilise la médiane. La suite de cette section détaille la procédure de ce test.

Tout d'abord, il est nécessaire de regrouper les données des deux (2) échantillons et de les ordonner dans l'ordre croissant. On détermine le rang de chaque valeur en commençant par la plus faible valeur. S'il existe plusieurs ex-aequo un rang moyen est calculé pour ces valeurs. Pour chaque échantillon i , on fait la somme des rangs notée T_i (voir équation (F.1)).

$$T_i = \sum_{j=1}^{n_1+n_2} R_{ij} \quad i = 1,2 \quad (\text{F.1})$$

On construit ensuite une statistique U_i pour chaque échantillon définie telle que :

$$U_i = n_1 \times n_2 + \frac{n_i(n_i + 1)}{2} - T_i \quad i = 1, 2 \quad (\text{F.2})$$

Le module de Statgraphics® Plus5 affiche le maximum des deux (2) statistiques U_1 et U_2 . Deux (2) cas au moins peuvent alors se présenter : échantillons de grande ou de petite taille. Les effectifs des échantillons de notre étude sont égaux à 5; il s'agit d'échantillons de petite taille. Dans ce cas-là, la méthodologie est la suivante :

La distribution de U n'est plus gaussienne. Mann et Whitney ont donc construit des tables que l'on consulte en fonction de la plus petite statistique U_i . Si la probabilité p lue dans les tables est supérieure au seuil de significativité (α), alors l'hypothèse nulle est acceptée, c'est-à-dire la différence entre les médianes des deux (2) échantillons est non-significative.

Si les échantillons étaient de grande taille, la méthodologie serait la suivante :

Mann et Whitney ont alors montré que U suit approximativement une loi normale $N(\mu_U, \sigma_U^2)$. La moyenne et l'écart-type de la distribution U sont donnés par les formules suivantes :

$$\mu_U = \frac{U_1 + U_2}{2} = \frac{n_1 \times n_2}{2} \quad (\text{F.3})$$

$$\sigma_U = \sqrt{\frac{n_1 \times n_2 (n_1 + n_2 + 1)}{2}} \quad (\text{F.4})$$

Ensuite, on calcule la statistique z associée.

$$z = \frac{|U_1 - \mu_U|}{\sigma_U} = \frac{|U_2 - \mu_U|}{\sigma_U} \quad (\text{F.5})$$

On calcule la probabilité p correspondant à z selon la loi normale centrée réduite.

B. Vérification de la variance à l'aide de Statgraphics® Plus5

La boîte de dialogue « vérification de variance » (*variance check*) déploie plusieurs outils qui fournissent ensuite une valeur p . Il y a quatre (4) tests :

- a. test C de Cochran;
- b. test de Bartlett;
- c. test de Hartley et;
- d. test de Levene.

Chacun de ces tests aboutit à une valeur p . La boîte de dialogue valide l'hypothèse nulle, variances égales si et seulement si la plus petite valeur p est supérieure au seuil de 0.05. Les sections suivantes expliquent ces différents tests. L'hypothèse nulle de ces tests est que toutes les variances sont égales. L'hypothèse alternative est qu'il existe une différence significative entre au moins deux (2) groupes.

Test C de Cochran

Ce test d'homogénéité des variances est affecté par la non-normalité de la distribution des données. La statistique C du test de Cochran est calculée de la manière suivante :

$$C = \frac{\max(S_i^2)}{\sum_i S_i^2} \quad (\text{F.6})$$

Notations :

S_i^2 Variance du $i^{\text{ème}}$ groupe

Ensuite, par référence à la table de la statistique C du test de Cochran, on détermine la valeur p . Les degrés de liberté sont k et $\max_i n_i - 1$.

Test de Bartlett

Ce test d'homogénéité de la variance est affecté par la non-normalité de la distribution des données. Ainsi ce test s'applique pour des groupes indépendants de distribution normale. Ce test requiert plus d'efforts de calculs que le test de Cochran.

$$\chi_0^2 = 2.30259 \frac{q}{c} \quad (\text{F.7})$$

$$q = (N - k) \log_{10} S_p^2 - \sum_{i=1}^k (n_i - 1) \log_{10} S_i^2 \quad (\text{F.8})$$

$$c = 1 + \frac{1}{3(k-1)} \left(\sum_{i=1}^k (n_i - 1)^{-1} - (N - k)^{-1} \right) \quad (\text{F.9})$$

$$S_p^2 = \frac{\sum_{i=1}^k (n_i - 1) S_i^2}{N - k} \quad (\text{F.10})$$

Notations :

| | |
|---------|---|
| S_p^2 | Variance agrégée |
| S_i^2 | Variance du $i^{\text{ème}}$ groupe |
| n_i | Taille du $i^{\text{ème}}$ groupe (adimensionnel) |
| N | Nombre total de données (adimensionnel) |
| k | Nombre de groupes (adimensionnel) |

Il faut remarquer que dans la littérature existante le logarithme à base décimale peut parfois être remplacé par le logarithme népérien. Le nombre de degrés de liberté est donné par $k-1$. En utilisant, une table de la distribution de χ^2 avec $k-1$ comme degré de liberté, on détermine la valeur p . L'avantage de ce test est qu'il peut comparer des échantillons de différentes tailles.

Test de Hartley

Le test de Hartley est le test le plus simple, le plus rapide mais aussi le moins précis. Ce test d'homoscédasticité est affecté par la non-normalité de la distribution des données. Le test de Hartley, appelé aussi le test de F_{max} , se calcule comme suit :

$$F_{max} = \frac{\max_i(S_i^2)}{\min_i(S_i^2)} \quad (\text{F.11})$$

F_{max} peut aussi être noté H (c'est le cas de Statgraphics \bar{R} Plus5). Cette valeur est finalement comparée dans une table de Hartley, dit aussi table du F_{max} , à une valeur théorique pour un seuil de risque choisi pour le non-rejet de l'hypothèse nulle. Les degrés de liberté sont k et $\max_i n_i - 1$.

Test de Levene

Le test de Levene est relativement simple. Ce test d'homogénéité des variances est peu affecté par la non-normalité de la distribution des données. Cependant, ce test a tendance à rejeter à tort l'hypothèse nulle (Ender, 2006). La statistique W du test de Levene se calcule de la façon suivante :

$$W = \frac{(N - k) \sum_{i=1}^k n_i (\bar{Z}_i - \bar{Z})^2}{(k - 1) \sum_{i=1}^k \sum_{j=1}^{n_i} (Z_{ij} - \bar{Z}_i)^2} \quad (\text{F.12})$$

Selon la littérature, Z_{ij} peut être déterminé selon une de ces définitions :

a. Z_{ij} est la différence entre les données y_{ij} et la moyenne du $i^{\text{ème}}$ groupe \bar{y}_i :

$$Z_{ij} = |y_{ij} - \bar{y}_i| \quad (\text{F.13})$$

b. Z_{ij} est la différence entre les données y_{ij} et la médiane du $i^{\text{ème}}$ groupe \tilde{y}_i :

$$Z_{ij} = |y_{ij} - \tilde{y}_i| \quad (\text{F.14})$$

c. Z_{ij} est la différence entre les données y_{ij} et la moyenne tronquée à 10 % du $i^{\text{ème}}$ groupe \bar{y}_i' :

$$Z_{ij} = |y_{ij} - \bar{y}_i'| \quad (\text{F.15})$$

La moyenne tronquée à 10 % du $i^{\text{ème}}$ groupe correspond à la moyenne des données du groupe i lorsque les 10 % de données les plus basses et les 10 % des plus élevées sont enlevés du groupe. Cela permet une meilleure estimation de la tendance centrale. Le choix d'une de ces trois (3) définitions détermine la robustesse et la puissance du test de Levene. La robustesse est la capacité à ne pas détecter à tort des variances différentes alors qu'elles sont en réalité égales. La puissance définit la capacité à détecter des variances différentes lorsqu'elles le sont réellement. L'utilisation de la moyenne tronquée performe mieux pour des distributions de Cauchy. L'utilisation de la médiane est la meilleure pour des distributions de χ^2 . L'utilisation de la moyenne est la plus puissante pour des distributions symétriques et peu aplaties. Lorsque la distribution des données est inconnue, la recommandation usuelle est d'employer la médiane. Pour déterminer la valeur p , on utilise la table de la distribution de F pour des degrés de liberté égaux à $k-1$ et $N-k$.

C. Test non-paramétrique de Kruskal-Wallis sur les moyennes

Le principe du test de Kruskal-Wallis est le suivant : les données de tous les groupes combinées sont triées par ordre croissant. Un rang est assigné à chaque donnée. Un rang moyen est calculé.

$$\bar{R}_i = \frac{\sum R_{ij}}{n_i} \quad (\text{F.19})$$

Notations :

| | |
|-------------|--|
| \bar{R}_i | Rang moyen du groupe i (adimensionnel) |
| R_{ij} | Rang de la $j^{\text{ème}}$ donnée du groupe i (adimensionnel) |
| n_i | Taille du groupe i (adimensionnel) |

Ensuite, la valeur statistique H est calculée.

$$H = \frac{12}{N(N+1)} \sum_{i=1}^k \bar{R}_i^2 * n_i - 3(N+1) \quad (\text{F.20})$$

N est le nombre d'observations et est calculé comme suit :

$$\text{Où : } N = \sum_{i=1}^k n_i \quad (\text{F.21})$$

Notations :

| | |
|-----|---|
| N | Nombre total de données (adimensionnel) |
| k | Nombre de groupes (adimensionnel) |

Enfin, on détermine la valeur p selon la distribution du χ^2 . Si elle est plus grande que 0.05 (seuil de confiance de 95 %) alors il n'existe pas de différence significative.

E. Méthode des boîtes à moustache avec encoches

Les boîtes à moustache (voir Figure F.1) sont des outils couramment utilisés lors de l'analyse statistique. Elles permettent une visualisation claire et concise de la population d'un échantillon. En outre, différentes comparaisons peuvent être directement effectuées à partir de ce diagramme. Les boîtes à moustaches sont utilisées lorsque l'analyse de la variance par la méthode HSD de Tukey n'est pas possible. Les méthodes DDA sont triées par ordre croissant de médiane \tilde{y}_i . Plus la médiane est faible, plus le critère de performance moyen est faible, plus la méthode de DDA est performante. Pour chaque boîte à moustache, on trace une encoche qui part de la médiane. Cette encoche représente l'intervalle de confiance à 95 % sur la médiane. Les limites de l'encoche supérieure (sup_i) et inférieure (inf_i) du groupe i sont calculées suivant les équations suivantes :

$$sup_i = \tilde{y}_i + 1,57 \frac{Q75_i - Q25_i}{\sqrt{n_i}} \quad (F.25)$$

$$inf_i = \tilde{y}_i - 1,57 \frac{Q75_i - Q25_i}{\sqrt{n_i}} \quad (F.26)$$

Notations :

$Q25_i$ 25^{ème} percentile du groupe i

$Q75_i$ 75^{ème} percentile du groupe i

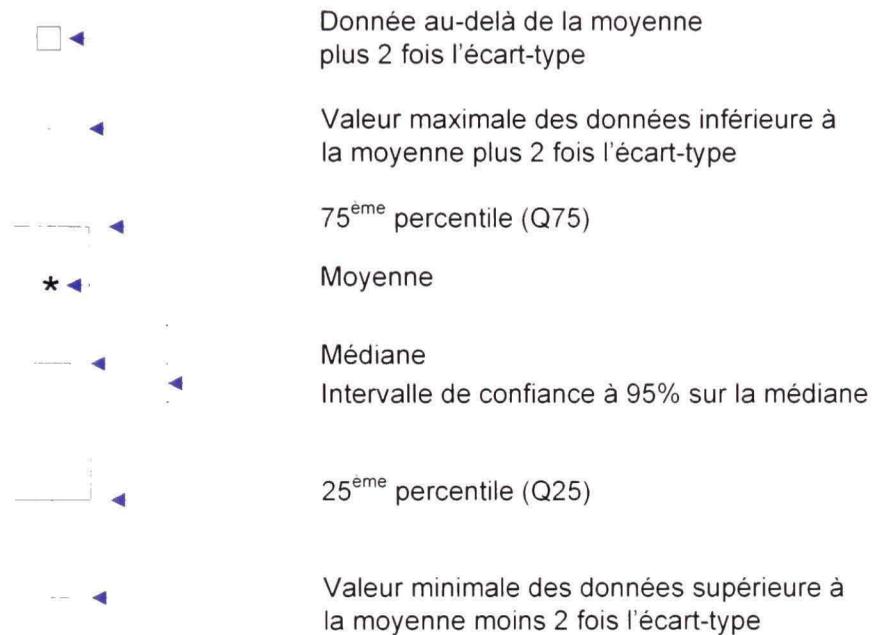


Figure F.1 Description d'une boîte à pattes avec encoche

La forme des boîtes à moustaches est déformée lorsque l'intervalle de confiance sur la médiane est plus large que le 25^{ème} et 75^{ème} percentile. Ensuite, nous comparons les groupes 2 à 2. Si les encoches de deux (2) groupes consécutifs se chevauchent, il n'a alors pas de différences significatives entre ces deux (2) groupes avec un taux de confiance de 95 %. Finalement, on obtient le classement des groupes par ensembles homogènes.

ANNEXE 5

Tests de significativité

Test sur la significativité du modèle

Tout d'abord, il faut calculer les sommes des carrés :

$$SCE = \sum (y_i - \hat{y}_i)^2 \quad (G.1)$$

$$SCT = \sum (y_i - \bar{y})^2 \quad (G.2)$$

$$R_{adj}^2 = 1 - \frac{SCE}{SCT} \frac{df_{error}}{df_{total}} \quad (G.3)$$

$$df_{error} = N - k_x - 1 \quad (G.4)$$

$$df_{total} = N - 1 \quad (G.5)$$

Notations :

| | |
|--------------|--|
| y_i | $i^{\text{ème}}$ performance observée |
| \hat{y}_i | Estimation de y_i selon le modèle de régression |
| \bar{y} | Moyenne des performances observées |
| SCE | Somme des erreurs au carré |
| SCT | Somme totale des carrés |
| R_{adj}^2 | Coefficient de vraisemblance ajusté dit aussi proportion de variabilité des données exprimée par le modèle |
| df_{error} | Degré de liberté de la somme des erreurs au carré |
| df_{total} | Degré de liberté de la variation totale |
| N | Nombre d'observations |
| k_x | Nombre de facteurs explicatifs dans le modèle de régression |

Si R_{adj}^2 est supérieur à 80 %, le modèle de régression est significatif dans son ensemble.

Test sur la significativité d'un effet

Voici les calculs à produire pour savoir si la contribution d'un facteur est significative. La question posée est de connaître l'apport marginal lorsque le facteur est introduit dans le modèle en termes de sommes des carrés. Mathématiquement cet apport s'écrit donc comme suit :

$$SCR(x_k | x_1, \dots, x_{k-1}) = SCR(x_1, \dots, x_{k-1}, x_k) - SCR(x_1, \dots, x_{k-1}) \quad (G.6)$$

$$\text{Avec } SCR = SCT - SCE \quad (G.7)$$

$$\text{Soit } SCR = \sum (\hat{y}_i - \bar{y})^2 \quad (G.8)$$

Notations :

SCR Somme des carrés expliqués par le modèle de régression

$$F_p = \frac{SCR(x_k | x_1, \dots, x_{k-1})}{SCR(x_1, \dots, x_k)} \frac{1}{N - k_x - 1} \quad (G.9)$$

$$F_p = \frac{[SCR(x_1, \dots, x_{k-1}, x_{k-1}) - SCR(x_1, \dots, x_{k-1})]}{SCR(x_1, \dots, x_k)} \frac{1}{N - k_x - 1} \quad (G.10)$$

F est appelé « F partiel » et est distribué selon la loi de Fisher avec 1 et $N - k_x - 1$ degrés de liberté. La règle de décision est la suivante si $F > F_{\alpha, k_x, N - k_x - 1}$ alors la contribution du facteur est jugée significative. Dans le cas présent, α est fixé à 10 %.

ANNEXE 6

Résultats des modèles pour JIS sous le critère MAL

| Variables explicatives | COM, CAP, VAR | |
|---|--|----------|
| Modèle de degré 1 | | |
| effet combinaison des autres variables | | |
| effet non significatif à 90% | VAR, COM | |
| R ² ajusté | | 26,6789% |
| Modèle de degré 2? | oui | |
| effet combinaison des autres variables | | |
| effet non significatif à 90% | VAR ² , VAR, CAP*VAR, COM | |
| R ² ajusté | | 31,8042% |
| Modèle de degré 3? | oui | |
| effet combinaison des autres variables | CAP ³ et VAR ³ | |
| effet non significatif à 90% | VAR, CAP*VAR ² , VAR ² , CAP*VAR, CAP ² *VAR, COM | |
| R ² ajusté | | 31,8042% |
| Modèle non-valide? | oui | |
| effets dont les VIF>10 | CAP, CAP ² | |
| effet avec changement de signe possible | | |
| R ² ajusté | | 31,8042% |
| Modèle non-valide? | oui | |

| Variables explicatives | COM, TOJ, NSS, VAR | |
|---|--|----------|
| Modèle de degré 1 | | |
| effet combinaison des autres variables | | |
| effet non significatif à 90% | VAR, COM | |
| R ² ajusté | | 52,4684% |
| Modèle de degré 2? | oui | |
| effet combinaison des autres variables | | |
| effet non significatif à 90% | NSS*TOJ, TOJ*VAR, NSS*VAR, VAR, VAR ² , COM | |
| R ² ajusté | | 62,4513% |
| Modèle de degré 3? | oui | |
| effet combinaison des autres variables | NSS*TOJ, NSS ³ , NSS ² *TOJ, NSS*TOJ ² , TOJ ³ , TOJ ² *VAR, VAR ³ | |
| effet non significatif à 90% | VAR, TOJ*VAR, NSS*VAR ² , NSS ² *VAR, VAR ² , NSS*VAR, TOJ*VAR ² , NSS*TOJ*VAR, COM | |
| R ² ajusté | | 62,4513% |
| Modèle non-valide? | oui | |
| effets dont les VIF>10 | NSS, TOJ, NSS ² , TOJ ² | |
| effet avec changement de signe possible | | |
| R ² ajusté | | 62,4513% |
| Modèle non-valide? | oui | |

ANNEXE 7

Résultats des modèles pour JIS sous le critère MSL

| Variables explicatives | COM, CAP, VAR | |
|---|--|----------|
| Modèle de degré 1 | | |
| effet combinaison des autres variables | | |
| effet non significatif à 90% | VAR, COM | |
| R ² ajusté | | 21,1936% |
| Modèle de degré 2? | oui | |
| effet combinaison des autres variables | | |
| effet non significatif à 90% | VAR ² , CAP*VAR, VAR, COM | |
| R ² ajusté | | 25,7108% |
| Modèle de degré 3? | oui | |
| effet combinaison des autres variables | CAP ³ et VAR ³ | |
| effet non significatif à 90% | CAP*VAR ² , VAR ² , CAP ² *VAR, CAP*VAR, VAR, COM | |
| R ² ajusté | | 25,7108% |
| Modèle non-valide? | oui | |
| effets dont les VIF>10 | CAP, CAP ² | |
| effet avec changement de signe possible | | |
| R ² ajusté | | 25,7108% |
| Modèle non-valide? | oui | |

| Variables explicatives | COM, TOJ, NSS, VAR | |
|---|--|----------|
| Modèle de degré 1 | | |
| effet combinaison des autres variables | | |
| effet non significatif à 90% | VAR, COM | |
| R ² ajusté | | 35,8221% |
| Modèle de degré 2? | oui | |
| effet combinaison des autres variables | TOJ ² | |
| effet non significatif à 90% | VAR ² , TOJ*VAR, NSS*VAR, VAR, COM | |
| R ² ajusté | | 51,0406% |
| Modèle de degré 3? | oui | |
| effet combinaison des autres variables | NSS*TOJ, NSS ³ , NSS ² *TOJ, NSS*TOJ ² , TOJ ³ , TOJ ² *VAR, VAR ³ | |
| effet non significatif à 90% | TOJ*VAR ² , NSS*VAR ² , VAR ² , NSS ² *VAR, NSS*TOJ*VAR, TOJ*VAR, NSS*VAR, VAR, COM | |
| R ² ajusté | | 51,0406% |
| Modèle non-valide? | oui | |
| effets dont les VIF>10 | NSS, TOJ, NSS ² , TOJ ² | |
| effet avec changement de signe possible | | |
| R ² ajusté | | 51,0406% |
| Modèle non-valide? | oui | |

ANNEXE 8

Résultats des modèles pour PUD sous le critère MAL

| Variables explicatives | COM, CAP, VAR |
|---|--|
| Modèle de degré 1 | |
| effet combinaison des autres variables | |
| effet non significatif à 90% | VAR, COM |
| R ² ajusté | 51,5272% |
| Modèle de degré 2? | oui |
| effet combinaison des autres variables | |
| effet non significatif à 90% | VAR ² , CAP*VAR, VAR, COM |
| R ² ajusté | 60,8711% |
| Modèle de degré 3? | oui |
| effet combinaison des autres variables | CAP ³ , VAR ³ |
| effet non significatif à 90% | CAP ² *VAR, CAP*VAR ² , VAR ² , CAP*VAR, VAR, COM |
| R ² ajusté | 60,8711% |
| Modèle non-valide? | oui |
| effets dont les VIF>10 | CAP, CAP ² |
| effet avec changement de signe possible | |
| R ² ajusté | 60,8711% |
| Modèle non-valide? | oui |

| Variables explicatives | COM, TOJ, NSS, VAR |
|---|--|
| Modèle de degré 1 | |
| effet combinaison des autres variables | |
| effet non significatif à 90% | VAR, COM |
| R ² ajusté | 70,5632% |
| Modèle de degré 2? | oui |
| effet combinaison des autres variables | NSS*TOJ, |
| effet non significatif à 90% | NSS*VAR, VAR ² , VAR, TOJ*VAR, TOJ, COM |
| R ² ajusté | 80,8756% |
| Modèle de degré 3? | non |
| effets dont les VIF>10 | NSS, NSS ² |
| effet avec changement de signe possible | |
| R ² ajusté | 80,8756% |
| Modèle non-valide? | non |

ANNEXE 9

Résultats des modèles pour PUD sous le critère MSL

| Variables explicatives | COM, CAP, VAR | |
|---|--|----------|
| Modèle de degré 1 | | |
| effet combinaison des autres variables | | |
| effet non significatif à 90% | VAR, COM | |
| R ² ajusté | | 33,5078% |
| Modèle de degré 2? | oui | |
| effet combinaison des autres variables | | |
| effet non significatif à 90% | VAR, CAP*VAR, VAR ² , COM | |
| R ² ajusté | | 41,3616% |
| Modèle de degré 3? | oui | |
| effet combinaison des autres variables | CAP ³ , VAR ³ | |
| effet non significatif à 90% | VAR, CAP ² *VAR, CAP*VAR, CAP*VAR ² , VAR ² , COM | |
| R ² ajusté | | 41,3616% |
| Modèle non-valide? | oui | |
| effets dont les VIF>10 | CAP, CAP ² | |
| effet avec changement de signe possible | | |
| R ² ajusté | | 41,3616% |
| Modèle non-valide? | oui | |

| Variables explicatives | COM, TOJ, NSS, VAR | |
|---|---|----------|
| Modèle de degré 1 | | |
| effet combinaison des autres variables | | |
| effet non significatif à 90% | VAR, COM | |
| R ² ajusté | | 49,7197% |
| Modèle de degré 2? | oui | |
| effet combinaison des autres variables | NSS*TOJ, | |
| effet non significatif à 90% | VAR ² , NSS*VAR, TOJ*VAR, VAR, COM | |
| R ² ajusté | | 69,4585% |
| Modèle de degré 3? | oui | |
| effet combinaison des autres variables | NSS*TOJ, NSS ³ , TOJ ³ , VAR ³ , NSS ² *TOJ, TOJ ² *NSS, NSS*TOJ*VAR | |
| effet non significatif à 90% | VAR ² *TOJ, VAR, NSS*VAR ² , VAR ² , TOJ ² *VAR, TOJ*VAR, NSS ² *VAR, NSS*VAR, COM | |
| R ² ajusté | | 69,4585% |
| Modèle non-valide? | oui | |
| effets dont les VIF>10 | NSS, TOJ, NSS ² , TOJ ² | |
| effet avec changement de signe possible | | |
| R ² ajusté | | 69,4585% |
| Modèle non-valide? | oui | |

ANNEXE 10

Résultats des modèles pour PUQ sous le critère MAL

| Variables explicatives | COM, CAP, VAR |
|---|--|
| <u>Modèle de degré 1</u> | |
| effet combinaison des autres variables | |
| effet non significatif à 90% | VAR, COM |
| R ² ajusté | 52,6712% |
| <u>Modèle de degré 2?</u> | oui |
| effet combinaison des autres variables | |
| effet non significatif à 90% | VAR ² , CAP*VAR, VAR, COM |
| R ² ajusté | 62,3221% |
| <u>Modèle de degré 3?</u> | oui |
| effet combinaison des autres variables | CAP ³ et VAR ³ |
| effet non significatif à 90% | CAP*VAR ² , VAR ² , CAP ² *VAR, CAP*VAR, VAR, COM |
| R ² ajusté | 62,3221% |
| Modèle non-valide? | oui |
| effets dont les VIF>10 | CAP, CAP ² |
| effet avec changement de signe possible | |
| R ² ajusté | 62,3221% |
| Modèle non-valide? | oui |

| Variables explicatives | COM, TOJ, NSS, VAR |
|---|--|
| <u>Modèle de degré 1</u> | |
| effet combinaison des autres variables | |
| effet non significatif à 90% | VAR, COM |
| R ² ajusté | 71,5475% |
| <u>Modèle de degré 2?</u> | oui |
| effet combinaison des autres variables | NSS*TOJ |
| effet non significatif à 90% | VAR ² , NSS*VAR, TOJ*VAR, VAR, TOJ, COM |
| R ² ajusté | 81,3896% |
| <u>Modèle de degré 3?</u> | non |
| effets dont les VIF>10 | NSS, NSS ² |
| effet avec changement de signe possible | |
| R ² ajusté | 81,3896% |
| Modèle non-valide? | non |

ANNEXE 11

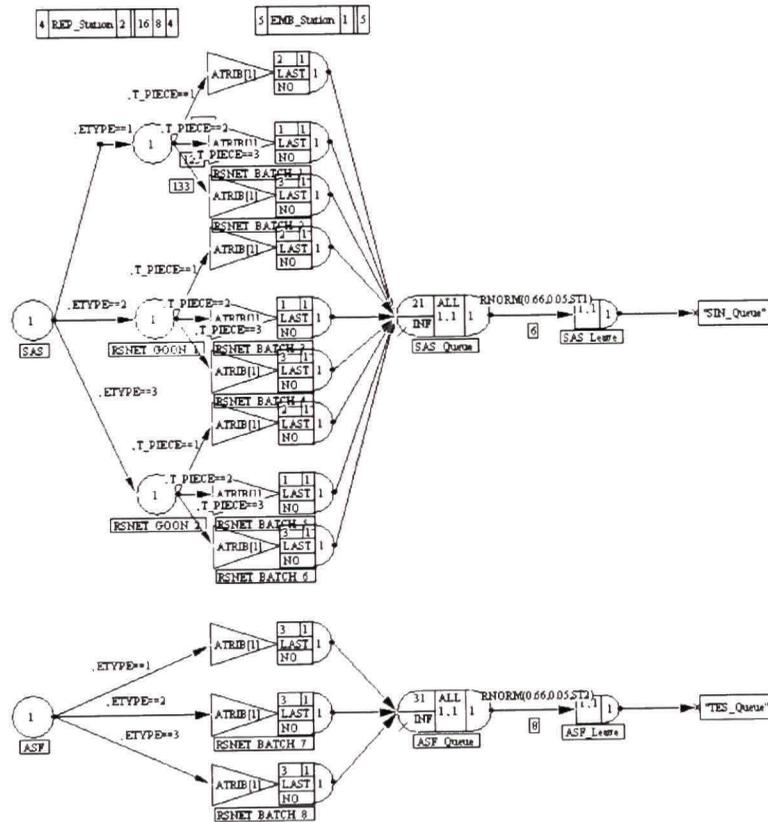
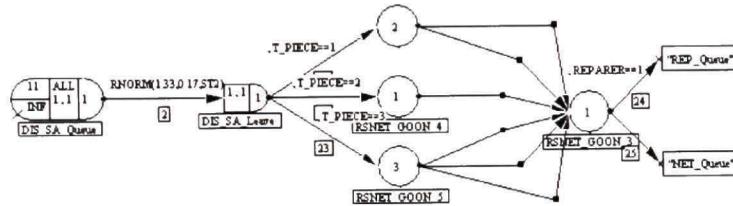
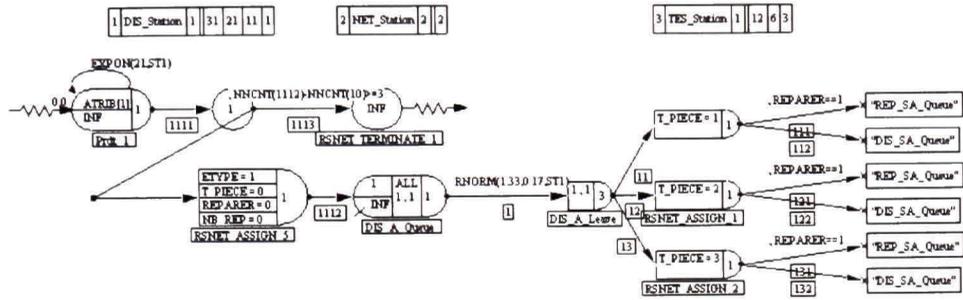
Résultats des modèles pour PUQ sous le critère MSL

| Variables explicatives | COM, CAP, VAR | |
|---|--|----------|
| Modèle de degré 1 | | |
| effet combinaison des autres variables | | |
| effet non significatif à 90° | COM, VAR | |
| R ² ajusté | | 35,4877% |
| Modèle de degré 2? | oui | |
| effet combinaison des autres variables | | |
| effet non significatif à 90° | VAR ² , COM, CAP*VAR, VAR | |
| R ² ajusté | | 44,5187% |
| Modèle de degré 3? | oui | |
| effet combinaison des autres variables | CAP ³ et VAR ³ | |
| effet non significatif à 90° | CAP*VAR ² , VAR ² , CAP ² *VAR, COM, CAP*VAR, VAR | |
| R ² ajusté | | 44,5187% |
| Modèle non-valide? | oui | |
| effets dont les VIF>10 | CAP, CAP ² | |
| effet avec changement de signe possible | | |
| R ² ajusté | | 44,5187% |
| Modèle non-valide? | oui | |

| Variables explicatives | COM, TOJ, NSS, VAR | |
|---|---|----------|
| Modèle de degré 1 | | |
| effet combinaison des autres variables | | |
| effet non significatif à 90° | COM, VAR | |
| R ² ajusté | | 52,3291% |
| Modèle de degré 2? | oui | |
| effet combinaison des autres variables | NSS*TOJ | |
| effet non significatif à 90° | VAR ² , COM, TOJ*VAR, NSS*VAR, VAR, | |
| R ² ajusté | | 73,3382% |
| Modèle de degré 3? | oui | |
| effet combinaison des autres variables | NSS*TOJ, NSS ³ , TOJ ³ , VAR ³ , NSS ² *TOJ, NSS*TOJ ² , NSS*TOJ*VAR | |
| effet non significatif à 90° | TOJ*VAR, TOJ*VAR ² , NSS*VAR ² , VAR ² , NSS ² *VAR, COM, TOJ ² *VAR, NSS*VAR, VAR | |
| R ² ajusté | | 73,3382% |
| Modèle non-valide? | oui | |
| effets dont les VIF>10 | NSS, TOJ, NSS ² , TOJ ² | |
| effet avec changement de signe possible | | |
| R ² ajusté | | 73,3382% |
| Modèle non-valide? | oui | |

ANNEXE 12

Réseau du système de réfection réel dans sa situation actuelle



ANNEXE 13

Contrôle du système de réfection réel dans sa situation actuelle

```
GEN,,"Refection System",1/06/2007,10,YES,YES;
LIMITS,,,,4;
EQUIVALENCE,{T_PIECE,TRIB[2]},{REPARER,TRIB[3]},{NB_REP,TRIB[4]};
EQUIVALENCE,{ST1,5*NNRUN},{ST2,5*NNRUN+1},{ST3,5*NNRUN+2},{ST4,5*NNRUN
+3}};
SEEDS,{,5,NO},{,6,NO},{,7,NO},{,8,NO},{,10,NO},{,11,NO},{,12,NO},{,13,
NO},{,15,NO},{,16,NO},{,17,NO},{,18,NO},{,20,NO},{,21,NO},{,22,NO},{,23
,NO},{,25,NO},{,26,NO},{,27,NO},{,28,NO},{,30,NO},{,31,NO},{,32,NO},{,3
3,NO},{,35,NO},{,36,NO},{,37,NO},{,38,NO},{,40,NO},{,41,NO},{,42,NO},{,
43,NO},{,45,NO},{,46,NO},{,47,NO},{,48,NO},{,50,NO},{,51,NO},{,52,NO},{
,53,NO}};
NETWORK,READ;
INITIALIZE,0.0,1825,YES,,NO;
PRIORITY,{1,FIFO},{2,FIFO},{3,FIFO},{4,FIFO},{5,FIFO},{6,FIFO},{8,FIFO
},{11,FIFO},{12,FIFO},{16,FIFO},{21,FIFO},{31,FIFO}};
FIN;
```

RÉFÉRENCES

1. Azaron A. and Kianfar F., (2006), "A multi-objective lead time control problem in multistage assembly systems using an interactive method," *Applied Mathematics and Computation (New York)*, vol. 176, pp. 609-620.
2. Baillargeon G., (2002), *Méthodes statistiques*, Trois-Rivières : Éditions SMG ; 2002, c2001 ed.
3. Chang F.-C. R., (1996), "Study of due-date assignment rules with constrained tightness in a dynamic job shop," *Proceedings of the 1996 19th International Conference on Computers and Industrial Engineering, Mar 4-6 1996*, vol. 31, pp. 205-208.
4. Cheng T. C. E., (1994), "Optimal due-date assignment in an assembly shop," *International Journal of Operations & Production Management*, vol. 14, pp. 31-42.
5. Dumond E. J., (2005), "Understanding and using the capabilities of finite scheduling," *Industrial Management and Data Systems*, vol. 105, pp. 506-526.
6. Ender P., (2006), "Linear Statistical Models Course," <http://www.gseis.ucla.edu/courses/ed230bc1/cnotes1/check.html>, consulté le 27/04/2007
7. Fatemi Ghomi S. M. T. and Rabbani M., (2003), "A new structural mechanism for reducibility of stochastic PERT networks," *European Journal of Operational Research*, vol. 145, pp. 394-402.
8. Gharbi A., Pellerin R., and Villeneuve L., (1996), "A simulation approach for improving the strategic planning of overhaul industries," presented at Proceedings of the 1996 IEEE Conference on Emerging Technologies and Factory Automation, ETFA'96. Part 1 (of 2), Nov 18-21 1996, Kauai, HI, USA.
9. Gordon V., Finke G., and Proth J.-M., (2002a), "Scheduling with due dates and deadlines," presented at ISIE 2002. Proceedings of the 2002 IEEE International Symposium on Industrial Electronics, 8-11 July 2002, L'Aquila, Italy.
10. Gordon V., Proth J.-M., and Chu C., (2002b), "A survey of the state-of-the-art of common due date assignment and scheduling research," *European Journal of Operational Research*, vol. 139, pp. 1-25.
11. Gordon V., Proth J.-M., Finke G., and Chu C., (2001), "Scheduling with common due date assignment," presented at 8th International Conference on Emerging Technologies and Factory Automation (ETFA 2001), Oct 15-18 2001, Antibes-Juan les Pins.
12. Gordon V. S., Proth J.-M., and Chu C., (2002c), "Due date assignment and scheduling: SLK, TWK and other due date assignment models," *Production Planning and Control*, vol. 13, pp. 117-132.

13. Guide Jr. V. D. R., Srivastava R., and Kraus M. E., (2000), "Priority scheduling policies for repair shops," *International Journal of Production Research*, vol. 38, pp. 929-950.
14. Guide V. D. R., Jr, Srivastava R., and Spencer M. S., (1997a), "An evaluation of capacity planning techniques in a remanufacturing environment," *International Journal of Production Research*, vol. 35, pp. 67-82.
15. Guide V. D. R., Jr., (2000), "Production planning and control for remanufacturing: industry practice and research needs," *Journal of Operations Management*, vol. 18, pp. 467-83.
16. Guide V. D. R., Jr., Jayaraman V., and Srivastava R., (1999), "Production planning and control for remanufacturing: a state-of-the-art survey," *Robotics and Computer-Integrated Manufacturing*, vol. 15, pp. 221-30.
17. Guide V. D. R., Jr., Srivastava R., and Kraus M. E., (1997b), "Product structure complexity and scheduling of operations in recoverable manufacturing," *International Journal of Production Research*, vol. 35, pp. 3179-99.
18. Gungor A. and Gupta S. M., (1999), "Issues in environmentally conscious manufacturing and product recovery: a survey," *Computers & Industrial Engineering*, vol. 36, pp. 811-53.
19. Hajji Adnène, (2005). notes de cours "Modélisation des systèmes de production", École de technologie supérieure, Montréal.
20. Harikrishnan K. K. and Ishii H., (2005). "Single machine batch scheduling problem with resource dependent setup and processing time in the presence of fuzzy due date," *Fuzzy Optimization and Decision Making*, vol. 4, pp. 141-147.
21. Hegedus M. G. and Hopp W. J., (2001), "Due date setting with supply constraints in systems using MRP," *Computers and Industrial Engineering*, vol. 39, pp. 293-305.
22. Keizers J., Adan I., and Van Der Wal J., (2001), "A queuing model for due date control in a multiserver repair shop," *Naval Research Logistics*, vol. 48, pp. 281-292.
23. Lawrence S. R., (1995), "Estimating flowtimes and setting due-dates in complex production systems," *IIE Transactions (Institute of Industrial Engineers)*, vol. 27, pp. 657-668.
24. Li C.-L. and Cheng T. C. E., (1999), "Due-date determination with resequencing," *IIE Transactions (Institute of Industrial Engineers)*, vol. 31, pp. 183-188.
25. Lin J. T. and Chen J.-H., (2005), "Enhance order promising with ATP allocation planning considering material and capacity constraints," *Journal of the Chinese Institute of Industrial Engineers*, vol. 22, pp. 282-292.
26. Lucas A. J. and Moses S. A., (2005), "Scalability and performance of computational structures for real-time order promising," *Journal of Intelligent Manufacturing*, vol. 16, pp. 5-20.

27. Lund R., (1983), "Remanufacturing United States Experience and Implications for Developing Nations," The World Bank, Washington, DC CPA/83-17.
28. Moses S. A., (1999), "Due date assignment using feedback control with reinforcement learning," *IIE Transactions (Institute of Industrial Engineers)*, vol. 31, pp. 989-999.
29. Ozdamar L. and Yazgac T., (1997), "Capacity driven due date settings in make-to-order production systems," *International Journal of Production Economics*, vol. 49, pp. 29-44.
30. Pontrandolfo P., (2000), "Project duration in stochastic networks by the PERT-path technique," *International Journal of Project Management*, vol. 18, pp. 215-222.
31. Saad S. M., Pickett N., and Kittiararam K., (2004), "An integrated model for order release and due-date demand management," *Techniques and Practices to Improve Responsiveness in Industry*, vol. 15, pp. 76-89.
32. Sha D. Y. and Hsu S. Y., (2004), "Due-date assignment in wafer fabrication using artificial neural networks," *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, vol. 23, pp. 768-775.
33. Sha D. Y. and Liu C.-H., (2005), "Using data mining for due date assignment in a dynamic job shop environment," *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, vol. 25, pp. 1164-1174.
34. Song D. P., Hicks C., and Earl C. F., (2002), "Product due date assignment for complex assemblies," *International Journal of Production Economics*, vol. 76, pp. 243-56.
35. Tang Y., (2001), "Modling, design, and scheduling of computer integrated manufacturing and demanufacturing systems," in *Electrical and Computer Engineering*: Faculty of New Jersey Institute of Technology, pp. 165.
36. Wang D., Fang S.-C., and Nuttle H. L. W., (1999), "Soft computing for multicustomer due-date bargaining," *IEEE Transactions on Systems, Man and Cybernetics Part C: Applications and Reviews*, vol. 29, pp. 566-575.
37. Wang J.-B., (2006), "Single machine scheduling with common due date and controllable processing times," *Applied Mathematics and Computation (New York)*, vol. 174, pp. 1245-1254.
38. Watanapa B. and Techanitisawad A., (2005), "A genetic algorithm for the multi-class contingent bidding model," *OR Spectrum*, vol. 27, pp. 525-49.
39. Yeh C.-H., (1995), "Production data modelling: an integrated approach," *International Journal of Operations & Production Management*, vol. 15, pp. 52-62.

40. Yildirim M. B., Cakar T., Doguc U., and Meza J. C., (2006), "Machine number, priority rule, and due date determination in flexible manufacturing systems using artificial neural networks," *Computers and Industrial Engineering*, vol. 50, pp. 185-194.