Centre d'Etude Doctorales : Sciences et Techniques de l'Ingénieur

N° d'ordre : 64 / 2021

THÈSE DE DOCTORAT

Présentée par

Mme. Assia SADIQI

Discipline : Génie Industriel

Spécialité : Génie Industriel

Thèse en codirection préparée au sein du Laboratoire de Génie Mécanique (LGM) de la Faculté des Sciences et Techniques de Fès et le Laboratoire de Recherche en Eco-innovation Industrielle et Energétique (LR2E) d'ECAM EPMI de Cergy Pontoise, France

Sujet de thèse : Contribution à la résolution des problèmes d'ordonnancement intégré de la production et de la maintenance sous contraintes d'énergie : Modélisation et expérimentation

Thèse présentée et soutenue le mardi 27 juillet 2021 à 10h à l'amphi A devant le jury suivant composé de :

Nom Prénom	Titre	Etablissement	
Pr. Driss AMEGOUZ	PES	École Supérieure de Technologie de Fès	**Président**
Pr. Rafik ABSI	PES	ECAM-EPMI, Cergy Pontoise, France	**Rapporteur**
Pr. Khalifa MANSOURI	PES	École Normale Supérieure de l'Enseignement Technique, Mohammadia	**Rapporteur**
Pr. Abdelouahhab JABRI	PH	Faculté des Sciences et Techniques de Fès	**Rapporteur**
Pr. Faouaz JEFFALI	PH	École Supérieure de Technologie d'Oujda	**Examinateur**
Pr. Bouchra RZINE	PH	Faculté des Sciences et Techniques de Fès	**Examinatrice**
Pr. Ikram EL ABBASSI **Pr. Ahmed EL BIYAALI**	PES PES	ECAM-EPMI, Cergy Pontoise, France Faculté des Sciences et Techniques de Fès	**Codirecteurs de thèse**
Pr. Abdellah EL BARKANY	PES	Faculté des Sciences et Techniques de Fès	**Directeur de thèse**

Laboratoires d'accueil : Génie Mécanique (LGM) / Recherche en Eco-innovation Industrielle et Energétique (LR2E).
Etablissements : Faculté des Sciences et Techniques de Fès / ECAM EPMI, Cergy Pontoise, France.

À mes chers parents

À mes chers frères

À mes chers professeurs

À tous ceux qui me sont chers

Remerciements

Cette thèse est la culmination de plusieurs années de travail acharné et de persévérance, réalisée dans le cadre d'une collaboration entre le Laboratoire de Génie Mécanique (LGM) de la Faculté des Sciences et Techniques (FST) de Fès et le Laboratoire de Recherche en Eco-innovation Industrielle et Énergétique (LR2E) d'ECAM-EPMI de Cergy pontoise en France. Ce projet de thèse de doctorat est le fruit d'une contribution individuelle menée avec diligence, avec l'aide et le soutien précieux de nombreuses personnes.

Je tiens à remercier le Professeur Driss AMEGOUZ pour l'honneur qu'il m'a fait de présider le jury de ma thèse, ainsi que Messieurs les Professeurs Khalifa MANSOURI, Abdelouahhab JABRI et Rafik ABSI pour l'intérêt et l'attention qu'ils ont accordé à ce travail de thèse et d'avoir accepté d'en être les rapporteurs. Je vous remercier pour le temps consacré à la lecture de cette thèse, ainsi que pour les remarques pertinentes m'ayant permis de l'améliorer. Je remercie également les Professeurs Faouaz JEFFALI et Bouchra RZINE qui me font l'honneur d'examiner mon travail de recherche et de faire partie de mon jury de thèse.

Je tiens à exprimer ma respectueuse reconnaissante à mes directeurs de thèse Monsieur Abdellah EL BARKANY ainsi que Monsieur Ahmed EL BIYAALI, non seulement pour son encadrement de haute qualité, ses précieux conseils et orientations, mais aussi pour sa disponibilité tout au long de la thèse et son dévouement. Il m'est particulièrement agréable d'exprimer ma gratitude et mes remerciements pour la confiance qu'il m'a témoignée depuis le début de la thèse.

Je voudrais également exprimer ma reconnaissance à Madame Ikram EL ABBASSI et Monsieur le feu Abdel Moumen DARCHERIF, Co-directeurs de thèse, pour avoir dirigé mes travaux avec beaucoup de disponibilité et d'encouragements. J'ai particulièrement apprécié la pertinence de leurs conseils avisés et leurs écoutes qui ont été prépondérants pour la bonne réussite de mes travaux généralement et de stage scientifique réalisé au sein de leur laboratoire particulièrement.

Je suis très honorée à remercier Monsieur Mustapha IJJAALI, Doyen de la FST de Fès, pour m'avoir assuré un environnement favorable pour mes travaux de recherche. Je remercie encore Madame Ahlame BAGDOURI, Vice-Doyen chargé de la recherche, de la formation continue et des relations extérieures et Monsieur El Mestafa EL HADRAMI, Directeur du Centre d'Études Doctorales "Sciences et Techniques et Sciences Médicales" USMBA Fès Maroc, pour son soutien permanent et sa disponibilité.

Je remercie chaleureusement Monsieur Ahmed EL HILALI ALAOUI, PES à L'Université Euromed de Fès (UEMF) ainsi que Monsieur le responsable de la bibliothèque de la FST de Fès, Abdelfattah TAHRI JOUTEI, pour leur gentillesse et la patience qu'ils ont manifestées à mon égard durant cette thèse, pour tous les conseils et la documentation qu'ils ont bien voulu m'envoyer. Leur disponibilité permanente et leurs conseils scientifiques pertinents ont largement contribué au bon déroulement de cette thèse.

Je profite de cette occasion pour remercier très sincèrement tous les professeurs du département de Génie Mécanique de la FST de Fès pour leurs conseils, qu'ils trouvent ici un témoignage de ma gratitude. C'est l'occasion d'exprimer mes sincères remerciements à mes parents et mes frères Messieurs Youssef SADIQI et Hicham SADIQI qui m'ont toujours encouragée et soutenue le long de mes études doctorales. Cette gratitude resterait incomplète sans la reconnaissance de mes meilleurs amis, Mr. Mohammed ZOUINI, Mme Ghita LEBBAR et Mme Oumaima BOUNOU pour leur appui moral.

Pour conclure ce préambule, je remercie toutes les personnes, de près ou de loin, qui ont contribué à l'aboutissement de ce travail. Ce présent travail a été rendu possible grâce à leur soutien.

Résumé

Dans le monde entier, les changements climatiques et les pénuries d'énergie se révèlent être à la fois une préoccupation mondiale et un des défis majeurs de la compétitivité et de l'innovation. De ce fait, les responsables de la production sont amenés à prendre en compte la nécessité d'économiser l'énergie dans leurs décisions. Dans cette optique, la question d'ordonnancement efficace sur le plan énergétique reçoit beaucoup plus d'attention qu'auparavant. Ainsi, chaque entreprise manufacturière et chaque pays devrait mettre en place des méthodes permettant de réduire la consommation énergétique. À ce titre, par le biais d'une recherche approfondie sur les problèmes d'ordonnancement, notre apport réside dans le fait de mettre en synergie et simultanément ces deux aspects, à savoir : les problèmes d'ordonnancement conjoint de la production prenant en compte les contraintes d'indisponibilité des machines dues aux interventions de maintenance ainsi que les problèmes d'ordonnancement conjoint de la production prenant en compte les contraintes énergétiques et environnementales. Dans cet esprit, l'objectif de notre contribution porte principalement sur la modélisation et la résolution de différents modèles d'ordonnancement conjoint de la production et de la maintenance en vue de gérer l'énergie en termes de consommation et des coûts énergétiques.

Dans cette thèse, la résolution des problèmes d'ordonnancement conjoint de la production et de la maintenance sous contraintes d'énergie a pour finalités principales la minimisation de la consommation totale d'énergie, à travers la minimisation de la date d'achèvement de la tâche la plus tardive nommée « makepsan ». De nombreux modèles et approches d'optimisation sont développés et largement exploités pour atteindre l'excellence en matière de productivité grâce au déploiement de la stratégie DSS (Dynamic Speed Scaling) dans l'ordonnancement intégré des tâches de production et de maintenance, ainsi qu'au développement d'approches multi-objectifs des nouvelles techniques d'économie d'énergie (SMT, PDT et SLT) intégrées dans l'ordonnancement conjoint. Cependant, l'application de tous ces outils et formalismes sur des systèmes englobant les paramètres les plus importants dans la littérature et les plus rencontrés dans les situations pratiques reste limitée.

Finalement, une première validation expérimentale des techniques suggérées a été effectuée dans une entreprise marocaine afin de minimiser la consommation d'énergie et les coûts d'électricité. Une deuxième validation industrielle a été appliquée dans une entreprise canadienne afin de résoudre les problèmes soulevés dans l'entreprise en termes de gestion de production et de maintenance des lignes de production de pièces automobiles. Cette dernière étude de cas vise à minimiser la pointe de puissance en contrôlant de manière coordonnée les dispositifs auxiliaires et le chauffage, en mettant en place un système de gestion de l'utilisation de l'énergie dans l'atelier pour optimiser la demande de pointe. Un algorithme de contrôle est proposé pour évaluer les résultats atteignables et différents formats de prix pouvant inciter les comportements désirés des consommateurs sont présentés. Les résultats ainsi que la validité des prix sont testés sur des simulations des besoins en équipements auxiliaires et des températures de 2020 au Canada. L'évaluation des résultats obtenus montre une baisse du pic de puissance soutirée. L'étude des formats de prix montre qu'un format de prix dual facturant la consommation et la puissance maximale soutirée est approprié.

Pratiquement, les problématiques posées au niveau des chaînes réelles de production touchent de très près les systèmes d'ordonnancement étudiés : il s'agit de minimiser les coûts énergétiques ainsi de minimiser simultanément la consommation d'énergie totale et le Makespan. Pour ce faire, une résolution exacte de Branch-and-Bound sous le logiciel CPLEX ainsi d'une résolution approchée à travers une amélioration de l'algorithme génétique de tri non-dominé (NSGA-II) sont effectuées pour résoudre les systèmes précités en fonction des paramètres des ateliers de production sous le logiciel PYTHON. Une optimisation mono-objectif et multi-objectifs a été proposée. Les résultats obtenus ont prouvé l'efficacité et l'intérêt des formalismes mathématiques proposés en vue de maximiser implicitement le profit, la performance et la productivité des systèmes de production.

Mots clés : Ordonnancement ; Production ; Maintenance ; Switching On/Off Machine ; Peak Power Demand ; Speed Scaling Level ; Time of use ; Modélisation ; Optimisation ; Expérimentation.

Abstract

Climate change and energy shortages are proving to be both a global concern and a major challenge to competitiveness and innovation worldwide. As a result, production managers have to take into account the need to save energy in their decisions. From this perspective, the issue of energy efficient scheduling is receiving much more attention than before. Thus, every manufacturing company and every country should implement methods to reduce energy consumption. As such, through an in-depth research on scheduling problems, our contribution lies in the fact of synergizing simultaneously these two aspects, namely: joint production scheduling problems taking into account the constraints of machine unavailability due to maintenance interventions as well as joint production scheduling problems taking into account energy and environmental constraints. In this spirit, the objective of our contribution focuses on the modeling and resolution of different joint production and maintenance scheduling models in order to manage energy consumption and costs.

In this thesis, the resolution of joint production and maintenance scheduling problems under energy constraints has as main goals the minimization of the total energy consumption, through the minimization of the completion date of the latest task named "makepsan". Numerous optimization models and approaches are developed and widely exploited to achieve productivity excellence through the deployment of Dynamic Speed Scaling (DSS) strategy in the integrated scheduling of production and maintenance tasks, as well as the development of multi-objective approaches of new energy saving techniques (SMT, PDT and SLT) integrated in joint scheduling. However, the application of all these tools and formalisms on systems including the most important parameters in the literature and the most encountered in practical situations remains limited.

Finally, a first experimental validation of the suggested techniques was performed in a Moroccan company in order to minimize energy consumption and electricity costs. A second industrial validation was applied in a Canadian company in order to solve the problems raised in the company in terms of production management and maintenance of automotive parts production lines. This last case study aims at minimizing the power peak by controlling in a coordinated way the auxiliary devices and the heating, by implementing an energy use management system in the workshop to optimize the peak demand. A control algorithm is proposed to evaluate the achievable results and different pricing formats that can incentivize desired consumer behaviors are presented. The results and the validity of the prices are tested on simulations of auxiliary equipment requirements and 2020 temperatures in Canada. The evaluation of the results shows a decrease in peak power demand. The study of pricing formats shows that a dual pricing format charging for consumption and peak power withdrawal is appropriate.

In practice, the problems posed at the level of real production lines are very close to the scheduling systems studied: it is a question of minimizing the energy costs as well as minimizing the total energy consumption and the Makespan simultaneously. To do so, an exact Branch-and-Bound solution under the CPLEX software as well as an approximate solution through an improvement of the genetic algorithm of non-dominated sorting (NSGA-II) are carried out to solve the above-mentioned systems according to the parameters of the production workshops under the PYTHON software. Single-objective and multi-objective optimization was proposed. The obtained results proved the efficiency and the interest of the proposed mathematical formalisms in order to implicitly maximize the profit, the performance and the productivity of the production systems.

Key words: Scheduling; Production; Maintenance; Switching On/Off Machine; Peak Power Demand; Speed Scaling Level; Time of use; Modeling; Optimization; Experimentation.

Table des matières

Remerciements **3**

Résumé **4**

Abstract **5**

Table des matières **6**

Liste des figures **11**

Liste des tableaux **14**

Liste des algorithmes **16**

Acronymes **17**

Introduction générale **18**

Chapitre 1 Contexte, état de l'art et positionnement **21**

1.1. Introduction 22

1.2. Présentation des problèmes d'ordonnancement d'atelier 23

1.2.1. Définitions 23

1.2.2. Classification des problèmes d'ordonnancement d'atelier 24

1.2.2.1. Ateliers à machine unique (Single Machine) 25

1.2.2.2. Ateliers à machines parallèles (Parallel Machines) 25

1.2.2.3. Ateliers à cheminement uniques (flow-shop) 26

1.2.2.4. Ateliers à cheminement multiples (job-shop) 26

1.2.2.5. Ateliers à cheminement libres (open-shop) 27

1.2.3. Schémas de classification 28

1.2.3.1. Système de notation ($\alpha \mid \beta \mid \gamma$) 28

1.2.4. Méthodes de résolution 28

1.2.4.1. Méthodes de résolution mono-objectif 29

1.2.4.2. Méthodes de résolution multi-objectifs 30

1.3. Ordonnancement de la production et de la maintenance : nécessité de la coopération 30

1.3.1. Aléas de l'ordonnancement de la production 30

1.3.2. Stratégies de maintenance 31

1.3.2.1. Types de maintenance 31

1.3.2.2. Objectifs de l'ordonnancement de maintenance 32

1.3.3. Stratégies de l'ordonnancement de la production et de la maintenance 33

1.3.3.1. Stratégie de l'ordonnancement séparé 33

1.3.3.2. Stratégie de l'ordonnancement séquentiel 34

1.3.3.3. Stratégie de l'ordonnancement intégré 34

1.3.4. Intérêts de l'ordonnancement simultané de la production et de la maintenance 35

1.4. Ordonnancement sous contraintes d'énergie 37
1.4.1. l'intégration du coût énergétique 37
1.4.2. l'intégration de la consommation énergétique 39
1.5. Problématique et orientation de l'activité de recherche : État de l'art 40
1.6. Objectif général de la thèse 47
1.7. Conclusion 47
Chapitre 2 Modèles d'ordonnancement conjoint de la production et de la maintenance sous contraintes d'énergie 49
2.1. Introduction 50
2.2. Formulation mathématique mono-objectif : Problème à machine unique 51
2.2.1. Exemples illustratifs 52
2.2.2. Fonction mono-objectif : Cas du modèle à machine unique 54
2.2.2.1. Consommation d'énergie des processus (PEC) 54
2.2.2.2. Consommation d'énergie commune (CEC) 54
2.2.2.3. Consommation totale d'énergie (TEC) 54
2.2.3. Modélisation du problème à une seule machine : $\mathbf{Sm|nr-CI|TEC}$ 55
2.2.4. Résolution exacte à travers l'algorithme branch-and-bound (B&B) 56
2.2.4.1. Implémentation informatique : $\mathbf{Sm|nr-CI|TEC}$ 57
2.2.5. Résolution approchée à travers des algorithmes génetiques (GA) 59
2.2.5.1. Procédure des algorithmes génétiques 59
2.2.5.2. Calibrage des paramètres des AGs : Plan d'expériences de Taguchi 60
2.2.5.3. Résultats et analyse comparative des méthodes 61
2.3. Formulation mathématique mono-objectif : Problème flowshop à plusieurs machines 67
2.3.1. Fonction mono-objectif : Cas du modèle flowshop à plusieures machines 70
2.3.1.1. Consommation d'énergie de traitement (PEC) 70
2.3.1.2. Consommation d'énergie commune (CEC) 70
2.3.1.3. Consommation totale d'énergie (TEC) 70
2.3.2. Modélisation du problème flow shop avec PM fixe : $\mathbf{Fm|nr-FI|TEC}$ 70
2.3.3. Modélisation du problème flowshop avec PM flexible : $\mathbf{Fm|nr-CI|TEC}$ 72
2.3.4. Résolution des problèmes : $\mathbf{Fm|nr-FI|TEC}$ || $\mathbf{Fm|nr-CI|TEC}$ 74
2.3.4.1. Essais et résultats numérique 74
2.3.4.2. Validation de la méthode de séparation et d'évaluation (B&B) 76
2.3.5. Analyse des résultats 77
2.3.5.1. Analyse des problèmes de petite taille 78
2.3.5.2. Analyse des problèmes de grande taille 79
2.4. Conclusion 82
Chapitre 3 Déploiement de la stratégie de l'échelle dynamique de la vitesse "DSS" dans l'ordonnancement conjoint de la production et de la maintenance 84

3.1. Introduction....85
3.2. Exemple illustratif....86
3.3. Formulation mathématique mono-objectif : Problème flowshop à deux machines....87
3.3.1. Fonction mono-objectif : Cas du modèle flowshop à deux machines....88
3.3.1.1. Consommation d'énergie des processus (PEC)....88
3.3.1.2. Consommation d'énergie en mode veille (IEC)....88
3.3.1.3. Consommation d'énergie commune (CEC)....88
3.3.1.4. Consommation totale d'énergie (TEC)....88
3.3.2. Modélisation du problème flowshop à deux machines : $\mathbf{F2|prmu-CIV|\ TEC}$....89
3.3.3. Résolution du problème : $\mathbf{F2|prmu-CIV|\ TEC}$....90
3.3.3.1. Essais et résultats de calcul....90
3.3.3.2. Analyse des résultats....92
3.4. Formulation mathématique mono-objectif : Problème flowshop à plusieurs machines....93
3.4.1. Fonction mono-objectif : Cas du modèle flowshop à plusieures machines....96
3.4.1.1. Consommation d'énergie de traitement (PEC)....96
3.4.1.2. Consommation d'énergie commune (CEC)....96
3.4.1.3. Consommation totale d'énergie (TEC)....96
3.4.2. Modélisation du problème flowshop avec PM fixe : $\mathbf{Fm|nr-FIV|TEC}$....97
3.4.3. Modélisation du problème flowshop avec PM flexible : $\mathbf{Fm|nr-CIV|TEC}$....98
3.4.4. Résolution des problèmes : $\mathbf{Fm|nr-FI|TEC}$ || $\mathbf{Fm|nr-CI|TEC}$....99
3.4.4.1. Essais et résultats numérique....99
3.4.5. Analyse des résultats....102
3.4.5.1. Analyse des problèmes de petite taille....103
3.4.5.2. Analyse des problèmes de grande taille....104
3.5. Conclusion....108

Chapitre 4 Développement des approches multi-objectifs sous contraintes des techniques d'économie d'énergie «SMT, PDT, SLT et DRT»: Validation expérimentale....109

4.1. Introduction....110
4.2. Problématique industrielle soulevée....111
4.3. Formulation mathématique multi-objectifs de la 1ère problématique du modèle flowshop : Forte consommation d'énergie due au processus de production des sièges d'automobile....113
4.3.1. Intégration des nouvelles techniques d'économie d'énergie....115
4.3.1.1. Switching on/off Machine Technique (SMT)....115
4.3.1.2. Peak Demand Technique (PDT)....116
4.3.1.3. Speed level Technique (SLT)....116
4.3.1.4. Exemple illustratif....117
4.3.2. Fonction multi-Objectifs : Cas du modèle flowshop....118

4.3.2.1. Consommation d'énergie de traitement (PEC) 119
4.3.2.2. Consommation d'énergie d'inactivité (IEC) 119
4.3.2.3. Consommation d'énergie de configuration (SEC) 119
4.3.2.4. Consommation totale d'énergie (TEC) 119
4.3.3. Modélisation du problème $\mathbf{Fm|nr-CIV|Cmax, TEC}$ 120
4.3.4. Algorithme Génétique de tri non dominant (NSGA-II) 122
4.3.5. Résultats numériques et analyses 128
4.3.5.1. Validation de l'algorithme 128
4.3.5.2. Impact des périodes de la maintenance : PM 128
4.3.6. Discussions 132
4.4. Formulation mathématique mono-objectif de la 2ème problématique du modèle à machine parallèles : Hausse des coûts au sein de l'atelier de fabrication des coussins en mousse 134
4.4.1. Intégration de la nouvelle technique d'économie d'énergie : DRT 137
4.4.2. Fonction mono-objectif : Cas du modèle à machines parallèles 138
4.4.2.1. Coût d'électricité (Electricity Cost) 138
4.4.2.2. Coût maximal lié au temps d'achèvement 138
4.4.2.3. Coût total d'électricité (Total Cost) 138
4.4.3. Modélisation du problème $\mathbf{Rm|nr-CI-DRT|Total\ Cost}$ 139
4.4.4. Résultats et analyses numériques des calculs 139
4.5. Conclusion 141
Chapitre 5 Optimisation de l'énergie dans un scénario des smart grids : Étude de cas au Canada 143
5.1. Introduction 144
5.2. Problématique industrielle soulevée 145
5.3. Formulation mathématique de la 1ère problématique : Performances énergétiques intensives en termes de consommation 146
5.3.1. Fonction objectif : $\mathbf{T.Energy}$ 148
5.3.1.1. Consommation d'énergie de traitement des tâches (PEC) 148
5.3.1.2. Consommation énergétique des appareils communs ($\mathbf{CEC}$) 148
5.3.1.3. Consommation totale d'énergie ($\mathbf{T.Energy}$) 148
5.3.2. Modélisation du problème : $\mathbf{Rm|nr-CI-DSS|T.\ Energy}$ 148
5.3.3. Résolutions et évaluation de la performance du modèle: $\mathbf{Rm|nr-CIV|T.Energy}$ 149
5.4. Formulation mathématique de la 2ème problématique : Gestion énergétique inefficace et coûteuse en termes de coûts énergétiques 151
5.4.1. Fonction Objectif : $\mathbf{T.Electricity.Cost}$ 152
5.4.1.1. Coût total de l'électricité 153
5.4.2. Modélisation du problème : $\mathbf{Rm|nr-CI-TOU|T.Electricity.Cost}$ 153
5.4.3. Résolutions et évaluation de la performance de la 2éme problématique: $\mathbf{Rm|nr-CI-TOU|T.Electricity.Cost}$ 154

5.5. Formulation mathématique de la 3ème problématique : Forte pic de consommation du aux usages énergétiques 156
5.5.1. Fonctions objectifs :**T**. **Cost**, **Pic** 158
5.5.1.1. Fonction coût pour le format de prix sur la consommation fixe 158
5.5.1.2. Fonction coût pour le format de prix sur la consommation variable 158
5.5.1.3. Fonction coût pour le format de prix dual facturant consommation et capacité 160
5.5.1.4. Fonction objectif de minimisation du pic 160
5.5.2. Énergie consommée et énergie perdue par le chauffage 160
5.5.3. Températures extérieures pour besoins en chauffage 161
5.5.4. Modélisation du problème : **Rm||T**. **Cost**, **Pic** 161
5.5.5. Résolutions et évaluation de la performance de la 3éme problématique: **Rm||T**. **Cost**, **Pic** 162
5.6. Conclusion 163
Conclusion générale et perspectives 164
Production scientifique 167
Bibliographie 170
Annexes 179

Liste des figures

Chapitre I

Figure 1.1 : Représentation d'un atelier à machine unique....25
Figure 1.2 : Représentation d'un atelier à machines parallèles....26
Figure 1.3 : Représentation d'un atelier de type flow-shop....26
Figure 1.4 : Représentation d'un atelier de type job-shop....27
Figure 1.5 : Représentation d'un atelier de type open-shop....27
Figure 1.6 : Classification des méthodes d'optimisation mono-objectif....29
Figure 1.7 : Classification des méthodes d'optimisation multi-objectifs....30
Figure 1.8 : Classification des types de maintenance....32
Figure 1.9 : Structure hierarchique des objectifs de l'ordonnancement de la maintenance....33
Figure 1.10 : Ordonnancement séparé....34
Figure 1.11 : Ordonnancement Séquentiel....34
Figure 1.12 : Ordonnancement Intégré....35
Figure 1.13 : Problème d'ordonnancement flowshop avec trois machines....35
Figure 1.14 : Ordonnancement séparé des tâches de la production et de la maintenance....36
Figure 1.15 : Conflits au niveau d'ordonnancement séparé des tâches de la maintenance et de la production [SAD, 2018b]....36
Figure 1.16 : Programmes de réponse à la demande....37
Figure 1.17 : Répartition du programme Event-Driven....38
Figure 1.18 : Répartition du programme Price -Driven....38
Figure 1.19 : Sources de consommation énergétique....39
Figure 1.20 : Evolution des publications des problèmes d'ordonnancement de la production et de la maintenance....41
Figure 1.21 : Pourcentage des critères d'optimisation adoptés dans la littérature....42
Figure 1.22 : Pourcentage des méthodes exactes et approchés....42
Figure 1.23 : Pourcentage de publications par type de méthode adoptée....43
Figure 1.24 : Publications des articles par journal....44
Figure 1.25 : Evolution des publications des problèmes d'ordonnancement sous contraintes d'énergie 47

Chapitre II

Figure 2.1 : Diagramme de Gant du plan initial du 1ér exemple 53
Figure 2.2 : Diagramme de Gantt intégrant une période de CM réalisée du 1ér exemple 53
Figure 2.3 : Diagramme de Gant du plan initial du 2éme exemple 53
Figure 2.4 : Diagramme de Gantt intégrant une période de CM réalisée du 2éme exemple 53
Figure 2.5 : Procédure de l'algorithme de séparation et évaluation 56
Figure 2.6 : Les composantes d'optimisation ILOG 57
Figure 2.7 : Mécanisme général de l'algorithme génétique 60
Figure 2.8 : Graphique des effets principaux du rapport (S/B) 61
Figure 2.9 : Délais d'exécution moyens pour les différentes instances 63
Figure 2.10 : Analyse comparative des délais moyens d'exécution pour les petits problèmes 63
Figure 2.11 : Analyse comparative des délais moyens d'exécution pour les grands problèmes 64
Figure 2.12 : Evolution de la consommation totale d'énergie et du Makespan selon les instances 64
Figure 2.13 : Evolution du Makespan selon les instances 65

Figure 2.14 : Evolution de la consommation totale d'énergie en fonction des instances pour les petits problèmes 66
Figure 2.15 : Evolution de la consommation totale d'énergie en fonction des instances pour les grands problèmes 66
Figure 2.16 : Planning du problème étudié flow shop avec PM fixe $\mathbf{Fm|nr-FI|TEC}$ 71
Figure 2.17 : Planning pour le problème flowshop avec PM flexible $\mathrm{Fm|nr-CI|}TEC$ 73
Figure 2.18 : Temps moyens d'exécution pour les différentes instances 77
Figure 2.19 : Comparaison des temps moyens d'exécution pour les deux cas des problèmes considérés 77
Figure 2.20 : Evolution de la consommation totale d'énergie et du Makespan en fonction des temps moyens d'exécution pour les deux cas des problèmes de petite taille 78
Figure 2.21. Evolution du Makespan en fonction des temps moyens d'exécution les deux cas des problèmes de petite taille 78
Figure 2.22 : Evolution de la consommation totale d'énergie et du Makespan en fonction des temps moyens d'exécution pour les deux cas des problèmes de grande taille 79
Figure 2.23 : Evolution du Makespan en fonction des temps moyens d'exécution pour les deux cas des problèmes de grande taille 80
Figure 2.24 : Evolution de la consommation totale d'énergie en fonction des scénarios et des instances pour le 1^{ér} cas des problèmes de grande taille 81
Figure 2.25 : Evolution de la consommation totale d'énergie en fonction des scénarios et des instances pour le 2^{éme} cas des problèmes de grande taille 82

Chapitre III

Figure 3.1: Diagramme de Gantt illustrant la solution optimale de « Permutation Flow Shop» 86
Figure 3.2: Diagramme de Gantt illustrant la solution optimale de « Non-Permutation Flow Shop».....86
Figure 3.3 : Evolution de la consommation totale d'énergie et du Makespan selon les instances.....92
Figure 3.4: Evolution du Makespan selon les instances 93
Figure 3.5: Temps moyens d'exécution pour les deux cas des problèmes considérés 102
Figure 3.6: Comparaison des temps moyens d'exécution pour les deux cas des problèmes de grande taille.....102
Figure 3.7 : Evolution de la consommation totale d'énergie et du Makespan en fonction des temps moyens d'exécution pour les deux cas des problèmes de petite taille.....103
Figure 3.8 : Evolution du Makespan en fonction des temps moyens d'exécution pour les deux cas des problèmes de petite taille 104
Figure 3.9: l'évolution de la consommation totale d'énergie et du Makespan en fonction des temps moyens d'exécution pour les deux cas des problèmes de grande taille.....105
Figure 3.10 : Evolution du Makespan en fonction des temps moyens d'exécution pour les deux cas des problèmes de grande taille 105
Figure 3.11: L'évolution de la consommation totale d'énergie en fonction des scénarios et des instances pour le 1^{ér} cas des problèmes de grande taille.....107
Figure 3.12 : L'évolution de la consommation totale d'énergie en fonction des scénarios et des instances pour le 2^{éme} cas des problèmes de grande taille.....107

Chapitre IV

Figure 4.1 : Aperçu global de l'entreprise étudiée 111
Figure 4.2 : Nomenclature relative au produit fini 112
Figure 4.3 : Diagramme synoptique de la technique SMT 116
Figure 4.4 : Diagramme synoptique de la technique PDT 116
Figure 4.5 : Diagramme de Gantt illustrant la solution intégrée pour: $\boldsymbol{Fm|nr-CIV|Cmax\,,TEC}$ ..117
Figure 4.6 : Mécanisme de NSGA II [Deb, 2000] 123
Figure 4.7 : Organigramme de l'algorithme NSGA-II 124
Figure 4.8 : Organigramme du problème utilisant l'algorithme NSGA-II 126
Figure 4.9 : Analyse des solutions dans le cadre des PM=50 129
Figure 4.10 : Analyse des solutions dans le cadre des PM=150 129
Figure 4.11 : Analyse des solutions dans le cadre des PM=300 129
Figure 4.12 : Comparaison des solutions sous différentes périodes de maintenance 130
Figure 4.13 : Profils de consommation d' énergie à plus petit makespan 132
Figure 4.14 : Profils de consommation d'énergie à faible consommation d'énergie 132
Figure 4.15 : Machines de production de mousse de siège en polyuréthane, haute qualité, avec injection 135
Figure 4.16 : Saisons et postes horaires 135
Figure 4.17 : Prix quotidien de l'électricité en l'hiver 136

Chapitre V

Figure 5.1 : Profils de consommation d'énergie pour les instances étudiées 150
Figure 5.2 : Profils de coût total d'électricité pour les instances étudiées 155
Figure 5.3 : Demande horaire moyenne d'électricité, ainsi que pour les journées de plus forte et plus faible consommation en 2019 [CHA, 2021] 156
Figure 5.4 : Horaires des périodes de pic pour tarif sur consommation variable selon le moment (Ontario Energy Board) 159
Figure 5.5 : Bulletin météo du 01 décembre 2020 à Ville de Québec 161
Figure 5.6 : Profils de minimisation du pic de puissance soutirée 163

Annexes

Figure A1.1 : Résultat optimale du scénario n° 1(5 tâches et de 2 machines) 180
Figure A2.1 : Résultat optimale du scénario n° 2 (6 tâches et de 3 machines) 180

Liste des tableaux

Chapitre I

Tableau 1.1 : Synthèse des publications sur les problèmes d'ordonnancement sous contraintes d'énergie.....46

Chapitre II

Tableau 2.1 : Notations utilisées pour formuler le problème à machine unique 52
Tableau 2.2 : Synthèse des résultats exacts obtenus du logiciel CPLEX 12.6 58
Tableau 2.3 : Différents niveaux de chaque paramètre des algorithmes génétiques 61
Tableau 2.4 : Paramètres optimaux des AGs.....61
Tableau 2.5 : Récapitulatif des résultats de comparaison entre GA et B&B.....62
Tableau 2.6 : Notations utilisées pour formuler le problème flow shop à plusieures machines.....68
Tableau 2.7 : Paramètres utilisées dans l'exemple étudié de l'atelier flowshop (7∗4).....70
Tableau 2.8 : Récapitulatif des résultats de calcul.....75
Tableau 2.9 : Comparaison des résultats obtenus.....76

Chapitre III

Tableau 3.1 : Données relatives à un atelier flowshop à 3 jobs et 4 machines.....86
Tableau 3.2 : Notations utilisées pour formuler le problème flow shop à deux machines.....87
Tableau 3.3 : Récapitulatif des résultats des calculs 91
Tableau 3.4 : Notations utilisées pour formuler les problèmes flowshop à plusieures machines 94
Tableau 3.5 : Récapitulatif des résultats de calcul.....100

Chapitre IV

Tableau 4.1 : Problématiques et pistes de réflexion au sein de l'entreprise.....112
Tableau 4.2 : Variables de décisions utilisées pour formuler le problème multi-objectif flowshop 113
Tableau 4.3 : Synthèse des modes de fonctionnement de la machine sous SMT.....114
Tableau 4.4 : Résultats numériques relatifs à la solution avec le petit makespan 130
Tableau 4.5 : Résultats numériques relatifs à la solution avec le plus faible consommation d'énergie 131
Tableau 4.6 : Redevances du tarif HT général (Amendis Tanger).....136
Tableau 4.7 : Notations utilisées pour formuler les problèmes 137
Tableau 4.8 : Temps de traitement des tâches (heures) pour le scénario n° 1 140
Tableau 4.9 : Données de consommation électrique pour le scénario n° 1 140
Tableau 4.10 : Résulats du scénario n° 1.....140
Tableau 4.11 : Temps de traitement des tâches (heures) pour le scénario n° 2 140
Tableau 4.12 : Données de consommation électrique pour le scénario n° 2 141
Tableau 4.13 : Résulats du scénario n° 2.....141

Chapitre V

Tableau 5.1 : Problèmatiques et pistes de réflexion au sein de l'entreprise Gaspésie Diesel 146
Tableau 5.2 : Notations utilisées pour formuler la 1ère problématique étudiée.....147
Tableau 5.3 : Analyse comparative des résultats obtenus par les différentes instances 150
Tableau 5.4 : Notations utilisées pour formuler la 2ème problématique étudiée.....151
Tableau 5.5. Analyse comparative des résultats obtenus par les différentes instances pour minimiser le coût total d'électricité 155
Tableau 5.6 : Notations utilisées pour formuler la 3ème problématique étudiée.....157
Tableau 5.7 : Tableau des prix avec tarif à prix uniforme 158
Tableau 5.8 : Tableau des prix avec tarif sur consommation variable selon le moment 159
Tableau 5.9 : Tableaux des prix à chaque heure avec tarif sur consommation variable selon le moment 159
Tableau 5.10 : Tableaux des prix avec tarif sur consommation et puissance.....160

Liste des algorithmes

Chapitre II

Algorithme 2.1 : Pseudo code de l'algorithme génétique GA 60

Chapitre IV

Algorithme 4.1 : Le pseudo-code de l'algorithme NSGA-II sous contraintes des techniques SMT, PDT et SLT. 127

Acronymes

AG	Algorithme Génétique
B&B	Branch and Bound
GA	Genetic Algorithm
GRASP	Greedy Randomized Adaptive Search Procedures
IBM	International Business Machines
ICG	Iterated cocktail greedy
LS	Local Search
MOGA	Multiple Objectives Genetic Algorithm
Np-complet	Non déterministe Polynomial-complet
NP-difficile	Non déterministe Polynomial-difficile
ONSN	Overall Number of Non-Dominated Solutions
OPL	Optimization Programming Language
PAES	Pareto Archived Evolution Strategy .
PF	Profile Fitting
PSO	Particle Swarm Optimization
RAM	Random Access Memory
NSGA-II	Non Dominated Sorting Genetic Algorithm- II
RSB	Release When Starting Blocking
SPEA	Strength Pareto Evolutionary Algorithm
TF	Facteur du retard
TS	Tabu Search
VEGA	Vector Evaluated Genetic Algorithm
DSS	Dynamic Speed Scaling
PDT	Peak Demand Technique
SMT	Switching ON/OFF Machine Technique
SLT	Speed Level Technique
DRT	Technique de la réponse à la demande
TOU	Time-Of-Use
CPP	Critical Peak Pricing
RTP	Real-Time Pricing
PTP	Peak Time Pricing

Introduction générale

Sur le plan mondial, le secteur industriel constitue le premier consommateur d'énergie, représentant environ 50 % de la demande énergétique totale. En outre, la demande énergétique industrielle a quasiment doublé au cours des 60 dernières années et devrait augmenter de 40 % d'ici 2030 [ZHA, 2013], [SAD, 2020c]. Cela entraîne des émissions importantes de gaz à effet de serre, une dépendance énergétique et des coûts sans cesse croissants pour les entreprises. Ainsi, la maîtrise de la consommation et le développement de la performance énergétique sont des enjeux majeurs en matière d'environnement et de protection de notre planète. Afin d'assurer une forte progression de la productivité, les gestionnaires reposent énormément sur des ordonnancements de production performants et robustes, tout en supposant que les ressources de production sont toujours disponibles. Et pourtant, les industries manufacturières sont dynamiques et soumises à diverses ruptures, aléas et circonstances imprévues.

Citons en guise dans ce cadre divers exemples de dysfonctionnements et perturbations, tels que le lancement de nouveaux produits ou la résiliation de commandes, défaillances aléatoires des machines et décalage des délais. Pour cette raison, le développement des politiques de maintenance a connu ces dernières années un fort dynamisme, depuis les interventions correctives appliquées après l'apparition des pannes, jusqu'à la maintenance préventive systématique effectuée périodiquement sur tous les équipements, en passant par la maintenance préventive conditionnelle, par laquelle il s'agit de surveiller l'état de santé des machines et d'intervenir lorsqu'un dommage est constaté, ou la maintenance prédictive, apparue récemment et qui se base sur des techniques de pronostic pour anticiper les pannes en estimant le temps d'utilisation restant avant leur apparition et en planifiant préalablement les interventions nécessaires pour les éviter. Cette politique de maintenance permet de réduire le nombre de pannes imprévues et donc le risque d'accidents dans les ateliers. Ce qui implique une énorme consommation d'énergie pour le traitement des tâches de la production et les perturbations imprévues.

Dans ce contexte, les entreprises manufacturières sont confrontées à de nouveaux défis à l'ère de l'énergie, qui exige des économies d'énergie en raison du coût croissant de l'électricité et de l'impact sur l'environnement. En effet, il est a indiqué que 90% de la consommation d'énergie industrielle et 84% des émissions industrielles de CO2 liées à l'énergie sont causés par les activités de fabrication [CUI, 2019]. Jusqu'à présent, il existe peu de recherches exhaustives et théoriques étroitement liées aux enjeux énergétiques, environnementaux ainsi qu'aux aspects temporels et économiques. Dans la littérature, cette réflexion est strictement orientée vers deux axes de recherche : l'ordonnancement sous contraintes de la maintenance et l'ordonnancement sous contraintes d'énergie.

Cette thèse de doctorat est consacrée essentiellement à combiner simultanément les divers aspects relatifs à l'ordonnancement de la production et de la maintenance afin d'améliorer les performances de production autant que de minimiser la consommation énergétique et les coûts d'électricité ainsi que la réduction de la facture énergétique. A ce stade, la préoccupation majeure de cette thèse est l'intégration entre ces multiples objectifs. Ainsi que des orientations de recherches approfondies dans les différents types d'ateliers : « Single Machine, Parallel Machines, Flow Shop,…». Pratiquement, deux applications ont été identifiées aux seins de deux entreprises MARTUR FOMPAK INTERNATIONAL au Maroc et Gaspésie Diesel Inc. située à New Richmond du Québec (Canada). Partant de ce constat le projet collaboratif qui est né entre le Laboratoire de Recherche en Eco-innovation Industrielle et Energétique (LR2E) d'ECAM EPMI de Cergy pontoise et le Laboratoire de Génie Mécanique(LGM) de la Faculté des Sciences et Techniques de Fès a constitué un élément décisif pour la réalisation de ce projet de doctorat. Ce rapport s'articule autour de cinq chapitres organisés de la manière suivante :

Dans le premier chapitre, une vue d'ensemble sur les problèmes d'ordonnancement conjoint de la production et de la maintenance sous contraintes d'énergie est exposée. L'objectif de ce chapitre est de rappeler les différents éléments qui interviennent dans un problème d'ordonnancement en détaillant les différents types d'ateliers et introduisant les différentes approches d'optimisation proposées dans la littérature pour la résolution des problèmes d'ordonnancement mono-objectif et multi-objectifs. Cette introduction aux problèmes d'ordonnancement nous mène à réaliser une étude bibliographique suivie d'un examen approfondi de l'état de l'art afin de positionner notre problématique et de mettre en évidence son intérêt scientifique et pratique. Le deuxième chapitre est dédié à la résolution mono-objectif des problèmes d'ordonnancement. Notre objectif est de combiner les deux aspects et directions de la recherche approfondie dans l'atelier à une seule machine et dans l'atelier flow shop à plusieurs machines. La présente étude porte sur deux thèmes de recherche : Le premièr est consacré au problème d'ordonnancement intégré des tâches de la production, de la maintenance préventive (PM) et de la maintenance corrective (CM) dans une seule machine afin de minimiser la consommation totale d'énergie (TEC) sous contraintes de robustesse et de stabilité du système. Nous proposons un modèle commun $\mathrm{Sm}|\mathrm{nr}-\mathrm{CI}|_{\mathrm{TEC}}$ afin d'intégrer les (PM) et (CM) dans l'ordonnancement. Sur la base de la méthode exacte Branch and Bound intégrée dans le solveur CPLEX et de l'algorithme génétique (GA) résolu dans le logiciel Python, les performances du modèle de programmation mixte binaire entier proposé sont testées et évaluées. Le second thème est relatif aux problèmes d'ordonnancement intégré des tâches de la production, de la maintenance préventive (PM) sous contraintes de deux types d'indisponibilité fixes et flexibles visant à minimiser la consommation totale d'énergie (TEC). Deux modèles de programmation binaires mixtes en nombres entiers $\mathrm{Fm}|\mathrm{nr}-\mathrm{FI}|_{\mathrm{TEC}}$ et $\mathrm{Fm}|\mathrm{nr}-\mathrm{CI}|_{\mathrm{TEC}}$ sont fournis pour dériver les ordonnancements optimaux. La performance des deux modèles de programmation entier binaire mixte proposé est évaluée en se basant sur la méthode exacte B§B intégrée dans le solveur CPLEX et des analyses sur le logiciel MATLAB.

Le troisième chapitre est consacré à la mise en œuvre d'une gestion intelligente de la charge en tant que solution pour le contrôle de la consommation (systèmes de contrôle, gestion optimale, variateurs de vitesse au sein de toutes les machines, ...). Dans la mesure où le problème consiste à affecter des tâches aux machines et à sélectionner un niveau de vitesse de traitement approprié pour chaque tâche, chaque individu est caractérisé par deux vecteurs : un vecteur d'affectation tâche-machine et un vecteur de vitesse. Par ailleurs, l'optimisation de la vitesse variable des opérations de traitement conduit à différents niveaux de consommation d'énergie. La présente étude porte sur deux cas d'ordonnancement de permutation et de non-permutation où la séquence de tâche n'est pas nécessairement identique sur toutes les machines : le premier est consacré à la mise en place d'un ordonnancement écologique des tâches et de périodes de maintenance flexibles dans un atelier de permutation « Flow Shop à deux machines » afin de minimiser le Makespan et la consommation totale d'énergie. Un modèle linéaire d'optimisation à nombres entiers mixtes $\mathrm{F2}|\mathrm{prmu}-\mathrm{CIV}|_{\mathrm{TEC}}$ est fourni pour dériver l'ordonnancement optimal. Le second est relatif à la mise en œuvre de la stratégie Dynamic Speed Scaling (DSS) aux problèmes d'ordonnancement intégré de la production et de la maintenance sous contraintes de deux types d'indisponibilité fixes et flexibles dans l'atelier de non-permutation « Flow Shop à plusieurs machines » visant à minimiser la consommation totale d'énergie (TEC). Deux modèles de programmation binaires mixtes en nombres entiers $\mathrm{Fm}|\mathrm{nr}-\mathrm{FIV}|_{\mathrm{TEC}}$ et $\mathrm{Fm}|\mathrm{nr}-\mathrm{CIV}|_{\mathrm{TEC}}$ sont fournis pour dériver les ordonnancements optimaux, respectivement. Les performances des trois modèles de programmation binaires mixtes à nombres entiers proposés sont évaluées sur la base de la méthode exacte de séparation et d'évaluation intégrée sur le solveur CPLEX ainsi que d'autres analyses sur Matlab. Les performances des modèles développés ont été démontrées par une étude approfondie des résultats.

Dans le quatrième chapitre, une première validation expérimentale vise à faire progresser le concept d'industrialisation en adoptant une approche plus intelligente et plus ciblée des questions écologiques et environnementales. Notre présence au sein de l'entreprise Martur Fompak INTERNATIONAL a répondu au besoin exprimé en vue de résoudre deux problématiques majeures dans l'entreprise, à savoir une grande consommation d'énergie au niveau de l'atelier d'assemblage des sièges et un cout élevé en vigueur dans l'atelier de fabrication des coussins en mousse. Le présent chapitre présente une résolution de ces problématiques comme suit :

- En intégrant à un véritable cas industriel trois nouvelles techniques d'économie d'énergie afin de minimiser simultanément la consommation d'énergie totale et le temps d'achèvement de toutes les tâches de la production et de la maintenance, notamment (Switching ON/OFF Machine Technique (SMT), Peak Demand Technique (PDT) et Speed Level Technique (SLT)). Une résolution approchée à travers une amélioration de l'algorithme génétique élitiste de tri non-dominé (NSGA-II) est effectuée pour résoudre le modèle d'ordonnancement de la production et de la maintenance afin de minimiser simultanément la consommation d'énergie totale et le Makespan sous le logiciel PYTHON version 3.6.
- En intégrant la stratégie de la réponse à la demande (DRT) dans un nouveau modèle MILP d'ordonnancement de la production et de la maintenance afin de minimiser les coûts de production, définis comme la somme pondérée des coûts de l'électricité en fonction du temps et les coûts de production liés au temps de réalisation de l'atelier de fabrication des coussins en mousse. Une résolution exacte de branch-and-bound intégrée dans le solveur CPLEX est effectuée pour résoudre le modèle d'ordonnancement de la production et de la maintenance afin de minimiser les coûts de production liés au temps de réalisation de l'atelier de fabrication des coussins en mousse et des analyses à l'aide du logiciel PYTHON. En outre, les méthodes proposées présentent d'excellentes performances en termes de faisabilité et d'exhaustivité.

Dans le cinquième chapitre, une deuxième étude de cas a été établie dans la société Gaspésie Diesel Inc., qui est devenu une référence en matière de réparation et d'entretien de véhicules de toutes marques située à New Richmond du Québec. Cette entreprise est équipée d'une ligne de fabrication dans le département des pièces. Ce chapitre présente une résolution des problématiques d'atelier dans cette entreprise comme suit :

- En intégrant à cette société la technique (« Dynamic Speed Scaling », DSST) au système étudié où les machines sont échelonnées en fonction de la vitesse, un modèle MILP est formulé afin d'intégrer cette gestion intelligente dans l'ordonnancement conjoint de la production et de la maintenance en vue d'optimiser la consommation totale d'énergie.
- La mise en œuvre d'un programme de gestion de la demande, utilisant le prix comme une mesure d'incitation avec un prix variable par bloc ("taux d'utilisation" ou TOU). Un nouveau modèle d'optimisation des coûts de l'électricité lors de l'ordonnancement intégré des tâches de la production et de la maintenance dans le cadre du système de tarification de l'électricité en fonction de l'heure de consommation (TOU) dans des machines parallèles non liées, dans lesquelles le prix de l'électricité varie tout au long de la journée a été utilisé.
- La mise en place d'une gestion des usages énergétiques dans l'atelier afin d'optimiser la demande de pointe. La recherche vise à minimiser la pointe de puissance soutirée par un atelier en contrôlant de façon coordonnée les installations auxiliaires et les machines utilisées dans l'atelier. Un algorithme de contrôle est proposé pour évaluer les résultats atteignables et différents formats de prix pouvant inciter les comportements désirés des consommateurs sont présentés.

Finalement, nous présentons une conclusion générale qui synthétise nos contributions et qui formule quelques perspectives de recherche qui peuvent découler de ces études.

Chapitre 1

Contexte, état de l'art et positionnement

Chapitre 1
Contexte, état de l'art et positionnement

1.1. Introduction

Au regard des progrès sociaux, économiques et scientifiques, les demandes en énergie augmentent rapidement. D'autre part, il est important d'assurer une consommation efficace de l'énergie afin de stimuler le développement économique et de préserver l'environnement. Dans la mesure où la pénurie d'énergie et la pollution de l'environnement deviennent progressivement plus problématiques, la question de son ordonnancement efficace sur le plan énergétique reçoit beaucoup plus d'attention qu'auparavant. En effet, les problèmes d'ordonnancement dans les différentes usines de production sont étroitement liés à la question de la consommation et des coûts énergétiques [SAD, 2020b].

En outre, il est de plus en plus important de produire de manière économique et en temps voulu dans le contexte concurrentiel actuel des entreprises et de l'environnement mondial. Dans ce contexte, il est essentiel pour de nombreuses entreprises manufacturières que la production soit optimisée grâce à un planning efficace et stabilisé sur le plan opérationnel. La documentation conventionnelle de la planification exige de supposer que les machines sont accessibles à tout moment. Néanmoins, ces machines et équipements sont souvent inaccessibles dès la phase de planification en raison de divers facteurs [SAD, 2018a] et [SAD, 2018b], notamment les pannes et les programmes de maintenance dans les environnements industriels traditionnels. Tous les problèmes d'ordonnancement ci-dessus sont compliqués par cette considération de disponibilité.

Un aspect déterministe affectant l'utilisation des machines, certains temps d'arrêt inattendus (par exemple, pannes, inversion de travail, délais entrants ou changeants) peuvent rapidement perturber l'ordonnancement. L'environnement de production en planification continue est toujours susceptible de se dégrader en fonction de l'utilisation, ce qui réduit la fiabilité des machines et affecte la stabilité du système de machines et d'équipements. L'efficacité de la maintenance prédictive dans l'industrie d'aujourd'hui s'étend à la maintenance préventive des machines et des systèmes. Pour qu'une machine puisse être entretenue, elle doit être réparée après avoir été utilisée en permanence pendant un certain temps. Par conséquent, un horizon de programmation étendu doit comprendre un certain nombre de périodes de maintenance [ZHI, 2015]. Dans la mesure où les tâches de production et de maintenance nécessitent un temps de disponibilité des machines, les tâches de maintenance préventive doivent être programmées exactement au même moment pour améliorer la productivité et les performances globales du système. Le secteur manufacturier peut aussi contribuer à la réduction des émissions de gaz à effet de serre. Il est donc très urgent d'améliorer l'efficacité de l'utilisation de l'énergie dans le secteur manufacturier, de réduire la consommation d'énergie et de renforcer la réduction des émissions de gaz à effet de serre [GAH, 2016], [GIR, 2015] et [MER, 2015].

L'objectif de ce chapitre est de présenter une revue de littérature sur les problèmes d'ordonnancement conjoint de la production et de la maintenance sous contraintes énergétique et environnementale. Dans la première partie de ce chapitre, des concepts de bases et les principales différentes approches de résolution des problèmes d'ordonnancement d'ateliers sont introduits. La deuxième partie porte sur le positionnement de notre problématique en se basant sur les références ayant, abordées, analysées et développées les problèmes d'ordonnancement d'ateliers et plus particulièrement, des différents ateliers de production, menant à déterminer des pistes de recherches futures.

1.2. Présentation des problèmes d'ordonnancement d'atelier

1.2.1. Définitions

Au sein des entreprises, l'ordonnancement occupe dans la gestion informatisée des flux de production une place privilégiée. Il est généralement le point de rencontre entre un système de production hiérarchique et informatisé et le système de production lui-même. . Il est l'interface entre l'élaboration globale de la commande et l'opérationnel. La gestion de la production crée les ordres de production qui déterminent globalement ce qui doit être fait dans une période de temps donnée (généralement la semaine). L'ordonnancement consiste à prévoir l'enchaînement de toutes les opérations élémentaires nécessaires à la réalisation de ces ordres de production sur les moyens de production, tout en prenant en compte les ressources secondaires (telles que les opérateurs, les outils, etc.), les contraintes externes (maintenance préventive, planning de travail, etc.) et l'existant (reste de la semaine précédente, tâches en cours, etc.).

L'ordonnancement est un processus de décision qui apparaît dans la plupart des systèmes de production et de transport ainsi que dans la gestion de projet. Contrairement aux systèmes de production de produits uniques ou aux ateliers gérés par le Kanban où le flux de production est naturel et devrait en principe s'autoréguler, l'ordonnancement des produits prend essentiellement sa place dans tous les ateliers ayant une production diversifiée en flux poussé, gérée par des ordres de production.

Dans la littérature sur les problèmes relatifs à l'ordonnancement, de nombreuses définitions de l'ordonnancement sont proposées. Selon [ROD, 1988], l'ordonnancement opérationnel d'un système de production industrielle consiste à gérer l'allocation des ressources dans le temps, tout en optimisant un ensemble de critères. Citons une autre définition centrée sur un problème d'ordonnancement [CAR, 1988] : « Un ordonnancement est une programmation de l'exécution d'une réalisation en attribuant des ressources aux tâches et en fixant leurs dates d'exécution ». Dans une perspective plus opérationnelle, [GOT, 1993] et [LOP, 2001] définissent un planning comme une organisation des tâches, en déterminant leurs dates de début et en leur allouant les ressources matérielles ou humaines nécessaires, de telle sorte que les contraintes soient respectées, afin d'optimiser un certain objectif préalablement défini. Autrement dit, un ordonnancement selon le [PAR, 1985], se définit comme suit : « Déterminer ce qui va être fait, quand, où et avec quels moyens; étant donné un ensemble de tâches à accomplir, le problème d'ordonnancement consiste à déterminer quelles tâches doivent être exécutées et à assigner des dates et des ressources à ces tâches de façon à ce que les tâches soient, dans la mesure du possible, accomplies en temps utile, au moindre coût et dans les meilleures conditions ».

Les deux définitions précédentes nous permettent de déterminer les éléments caractérisant un problème d'horaire. Un problème d'ordonnancement est généralement composé d'un ensemble de tâches soumises à certaines contraintes, et dont l'exécution nécessite des ressources. La résolution d'un problème d'ordonnancement consiste à organiser ces tâches, c'est-à-dire à déterminer leurs dates de début et à leur affecter des ressources, de manière à ce que les contraintes soient respectées.

Une **tâche** est un travail (ou une fonction) dont la réalisation nécessite un certain nombre d'opérations élémentaires. Chaque opération élémentaire nécessite un certain nombre d'unités de temps (sa durée) et d'unités de ressources.

Une **ressource** est un moyen, technique ou humain, permettant la réalisation des tâches et dont la disponibilité limitée ou non est connue au préalable. Il existe deux types de ressources : les ressources renouvelables et les ressources consommables. Une ressource est renouvelable si, après avoir été affectée à une tâche, elle devient disponible pour d'autres. Une ressource est consommable si, après avoir été allouée à une tâche, elle n'est plus disponible pour les autres tâches à réaliser.

Une **contrainte** exprime des restrictions sur les valeurs que les variables représentant les relations entre les tâches et les ressources peuvent prendre ensemble. Une distinction est faite entre les contraintes de temps et les contraintes de ressources. Les contraintes de temps sont intégrées :

- les contraintes de temps, résultant généralement d'impératifs de gestion et relatives aux délais des tâches (délais de livraison, disponibilité des fournitures, etc.) ;
- les contraintes d'antériorité et plus généralement les contraintes de cohérence technologique, qui décrivent le positionnement relatif de certaines tâches par rapport à d'autres ;
- les contraintes de calendrier liées au respect des horaires de travail, etc.

Les contraintes de ressources reflètent le fait que les ressources sont disponibles en quantité limitée. Il existe deux types de contraintes de ressources, liées à la nature disjonctive ou cumulative des ressources. Une ressource disjonctive ne peut être utilisée que par une seule tâche à la fois. En revanche, dans une ressource cumulative, les ensembles de tâches qui ne peuvent être exécutées simultanément sont d'une quelconque cardinalité. Les contraintes de ressources traduisent le fait que les ressources sont disponibles en quantité limitée. On distingue deux types de contraintes de ressources, liées à la nature disjonctive ou cumulative des ressources. Une ressource disjonctive ne peut être utilisée que par une tâche à la fois. Par contre dans une ressource cumulative, les ensembles de tâches non réalisables simultanément sont de cardinalité quelconque.

Un **critère d'optimisation** correspond aux objectifs à optimiser afin de mesurer la performance de l'ordonnancement construit. Nous pouvons les classer en critères réguliers et irréguliers [KAC, 2003].

- **Les critères réguliers :** ils sont dits réguliers car la valeur de la fonction objectif ne peut pas diminuer par l'insertion de temps mort entre deux tâches consécutives [HOO, 2005]. Ainsi, ils représentent des fonctions décroissantes des dates d'accomplissement des opérations. Parmi ces critères, nous pouvons mentionner :
  - La minimisation des dates d'achèvement des actions ;
  - La minimisation du maximum des dates d'achèvement des actions ;
  - La minimisation de la moyenne des dates d'achèvement des actions ;
  - La minimisation des retards sur les dates d'achèvement des actions ;
  - La minimisation du maximum des retards absolus sur les dates d'achèvement des actions ;
  - La minimisation de la moyenne des retards sur les dates d'achèvement des actions ;
  - La minimisation du temps du cycle (dans le cas d'un ordonnancement cyclique).
- **Les critères irréguliers :** ils sont dits irréguliers car ils ne sont pas des fonctions monotones des dates de fin d'exécution des opérations. De plus, il est possible dans ce cas, de mettre au point le coût d'une solution en ajoutant un temps mort entre deux tâches consécutives, tels que :
  - La minimisation des encours ;
  - La minimisation du coût de stockage des matières premières ;
  - L'équilibrage des charges des machines ;
  - L'optimisation des changements d'outils.

1.2.2. Classification des problèmes d'ordonnancement d'atelier

Résoudre un problème d'ordonnancement d'un atelier consiste à trouver un ordonnancement optimal qui minimise une ou plusieurs mesures de performance données en respectant les contraintes techniques et temporelles prises en considération pour la résolution.

Les problèmes d'ordonnancement peuvent être classés en fonction du nombre de machines et de leur ordre d'utilisation pour la fabrication d'un produit (ligne de production permettant d'établir la séquence

logique des opérations), qui dépend de la nature de l'atelier. Un atelier est défini par le nombre des machines qu'il contient et par son type. Les différents types possibles sont les suivants :

- Ateliers à machine unique (Single Machine) ;
- Ateliers à machines parallèles (Parallel Machines) ;
- Ateliers à cheminement unique (flow-shop) ;
- Ateliers à cheminements multiples (job-shop) ;
- Ateliers à cheminements libres (open-shop).

1.2.2.1. Ateliers à machine unique (Single Machine)

Ce type d'atelier est composé d'une seule machine qui traite toutes les gammes de production comme illustré dans la figure 1.1. Ce type d'atelier est le plus problématique et est de moins en moins répandu dans l'industrie en raison des différents handicaps rencontrés (goulot d'étranglement, surexploitation de la ressource, file d'attente interminable, temps de production exponentiel, etc.).

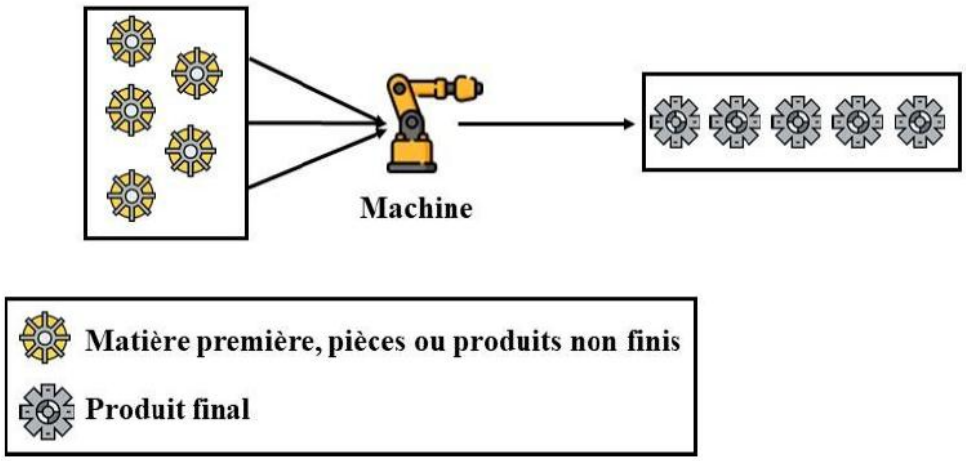

Figure 1.1 : Représentation d'un atelier à machine unique

1.2.2.2. Ateliers à machines parallèles (Parallel Machines)

Dans ce type d'atelier, chaque job a la même séquence d'opération. L'atelier à machines parallèles peut être considéré comme étant un atelier à machine unique avec redondance de machines étant donné que toutes les machines sont identiques comme indiqué dans la figure 1.2. Cependant, contrairement au type précédent, la redondance de machine permet d'accélérer la production et d'éviter l'arrêt du système dans le cas d'une panne de machine.

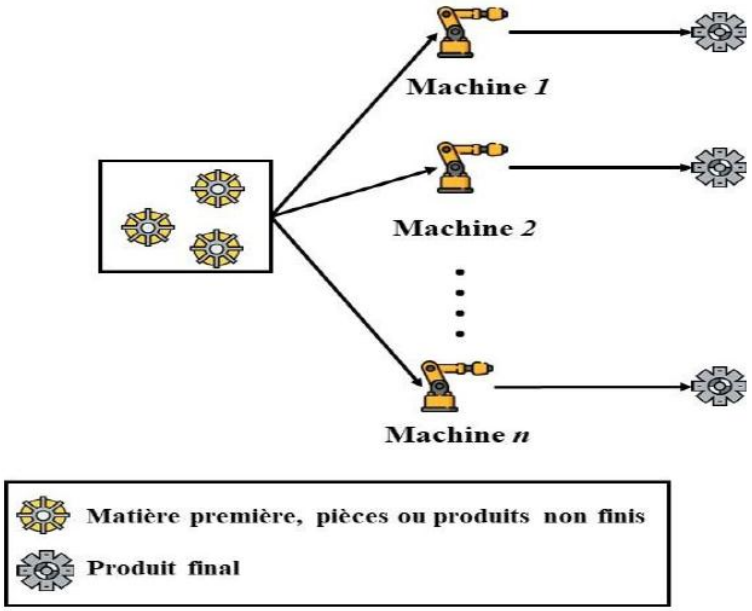

Figure 1.2 : Représentation d'un atelier à machines parallèles

1.2.2.3. Ateliers à cheminement uniques (flow-shop)

Les ateliers de type Flow shop ont pour particularité d'avoir un processus de fabrication linéaire. Ce type d'atelier est constitué d'un ensemble de ressources où le traitement de chaque produit se fait de manière chainée (voir figure 1.3). Le flux de chaque produit est unidirectionnel et chaque opération de chaque job est exécutée dans le même ordre. Ce type d'atelier est rencontré généralement dans les productions en série, où les gammes opératoires sont identiques.

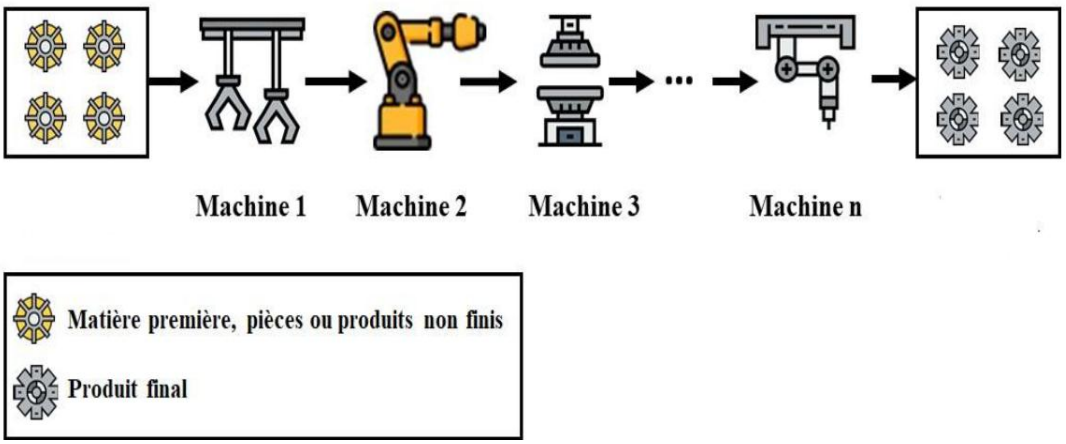

Figure 1.3 : Représentation d'un atelier de type flow-shop

1.2.2.4. Ateliers à cheminement multiples (job-shop)

Dans ce type, les tâches ne s'exécutent pas sur toutes les machines dans le même ordre. En effet, chaque tâche emprunte un chemin qui lui est propre comme le montre la figure 1.4. Ce type correspond généralement à une production par lot, notamment dans une unité de production disposant de moyens polyvalents utilisés suivant des séquences différentes afin de réaliser des produits divers.

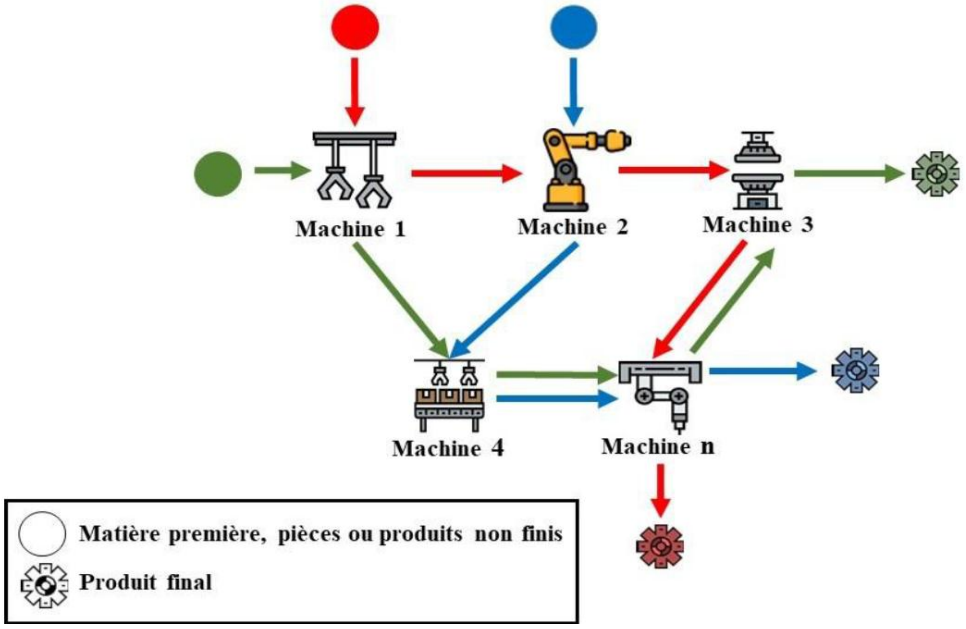

Figure 1.4 : Représentation d'un atelier de type job-shop

1.2.2.5. Ateliers à cheminement libres (open-shop)

Dans ce type, les contraintes de précédence sont relâchées. En d'autres termes, les opérations nécessaires à la réalisation de chaque tâche peuvent être effectuées dans n'importe quel ordre (les gammes sont libres). Le schéma synoptique de la typologie des problèmes d'ordonnancement d'atelier open- shop est représenté par la figure 1.5.

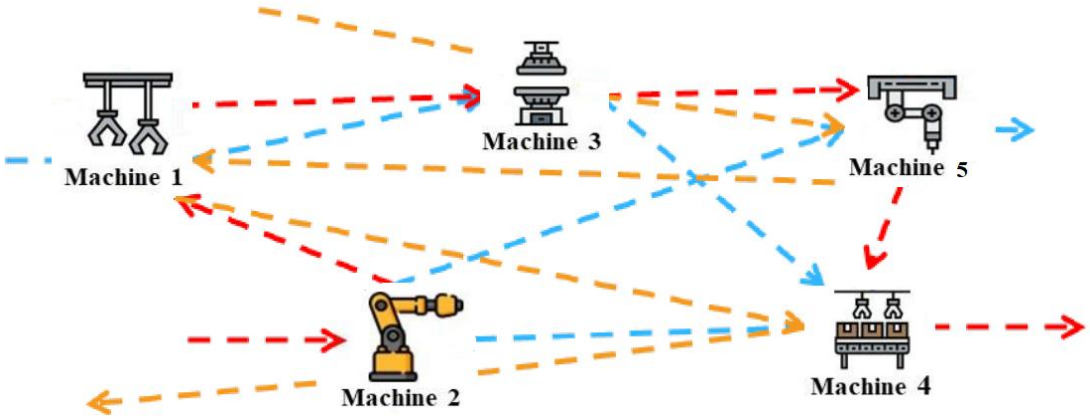

Figure 1.5 : Représentation d'un atelier de type open-shop

1.2.3. Schémas de classification

1.2.3.1. Système de notation (α | β | γ)

Une manière de simplifier les problèmes d'ordonnancement consiste à adopter une terminologie permettant d'identifier rapidement un problème d'ordonnancement donné. La notation la plus utilisée est celle suggérée par [GRA, 1979]. Elle est basée sur la concaténation de trois champs distincts **α|β|γ**.

Le champ α dépend de deux paramètres que nous pouvons représenter de la manière suivante : **α** = α1α2. Le premier paramètre α1 permet de décrire l'environnement manufacturier. Tandis que le deuxième α2 indique le nombre de machines. Le champ β possède une forme générique qui peut être notée ß=ß1ß2…ßn. Il permet de définir l'ensemble des contraintes concernant les jobs prises en compte. Les contraintes les plus répandues dans la littérature sont :

- **Perm** : Indique que les travaux sont traités dans chaque étape dans le même ordre. Elle est valable uniquement pour les problèmes de type Flow-shop où on ne considère que l'ensemble des ordonnancements de permutation ;
- **Prec** : Indique qu'il y a des contraintes de précédence entre les opérations ;
- $\mathbf{d_i}$: Signifie que les travaux ont des dates de fin au plus tard souhaitées ;
- $\mathbf{r_i}$: Indique que les travaux ont des dates de disponibilité différentes ;
- **Block** : Signifie que l'atelier dispose d'une zone de stockage de capacité limitée entre chaque machine, ce qui peut conduire à des blocages sur les machines ;
- **Snsd** : Indique qu'il y a un temps de réglage avant le traitement de chaque opération, ces temps dépendent de la séquence des opérations sur chaque machine ;
- **Batch** : Signifie que les opérations peuvent être regroupées en paquets lors de leurs exécutions.

Enfin, le champ **γ** correspond aux critères de performances à optimiser. Les critères les plus cruciaux permettant d'évaluer une solution d'un problème d'ordonnancement sont l'utilisation efficace des ressources, le délai total et le respect des dates d'échéances. Dans ce contexte, les variables qui interviennent le plus souvent dans l'expression de la fonction objectif en théorie d'ordonnancement sont :

- **La durée totale d'ordonnancement** : plus connue sous son appellation anglaise « Makespan ». Ce critère représente la date d'achèvement de la tâche la plus tardive C_J et il est défini par C_{max}= Max C_J ;
- **La somme des dates de fin d'exécution des travaux** : elle représente le temps total nécessaire pour la réalisation des tâches $\sum C_J$;
- **Le maximum des retards absolus** : défini par T_{max}= max T_J , tel que T_J= max (0, C_J-d_J) désigne le retard de la tâche j et d_J est la date de fin souhaitée ou encore la date d'échéance ;
- **Le maximum des retards absolus algébriques** : défini par L_{max}= Max L_J , tel que L_J= C_J-d_J représente le retard algébrique.

1.2.4. Méthodes de résolution

Étant donné que les problèmes d'ordonnancement visent à trouver dans un ensemble discret une parmi les meilleures solutions réalisables, définie par une fonction objectif, en affectant des tâches aux ressources, ils sont considérés comme des problèmes d'optimisation combinatoire. Cependant, un problème d'optimisation combinatoire consiste à trouver un optimum d'une fonction objectif donnée en respectant les contraintes appliquées, faute de quoi la solution ne peut être réalisable. Cette nécessité

d'optimiser se produit par l'importance d'assurer aux utilisateurs un système calibré répondant au mieux à leurs exigences. À la différence des problèmes d'optimisation qui cherchent à optimiser une seule fonction coût, ils existent des problèmes d'optimisation où plusieurs fonctions objectifs doivent être optimisées menant souvent à des situations dites contradictoires [ROY, 1993].

1.2.4.1. Méthodes de résolution mono-objectif

Les problèmes mono-objectifs sont définis par une seule fonction économique. Du fait que les problèmes d'ordonnancement sont des problèmes d'optimisation combinatoires qui se rencontrent dès lors qu'il est nécessaire de programmer dans le temps l'allocation des tâches aux ressources, nombreux sont les travaux de recherche qui ont été publiés sur leurs approches de résolution, compte tenu des différentes contraintes de réalisation. La figure 1.6 regroupe l'ensemble des approches d'optimisation les plus connues, dont nous distinguons principalement :

- **Les méthodes exactes :** qui permettent de fournir une solution exacte selon une stratégie connue [SMI ,1967] ;
- **Les méthodes approchées :** qui visent à obtenir des solutions approchées ayant un écart raisonnable par rapport à la solution optimale [OSM, 1989]. Généralement, l'efficacité des méthodes d'optimisation mono-objectif, utilisées pour la résolution de ce type de problèmes, se rapporte à deux facteurs principaux étant la qualité des solutions fournies et le temps d'exécution. Cependant, étant donné que ces problèmes sont justifiés par une forte complexité théorique, il n'existe à ce jour aucune approche de résolution universelle qui permet de fournir une solution optimale en un temps polynomial ou sans que le temps d'exécution n'augmente exponentiellement avec la taille du problème.

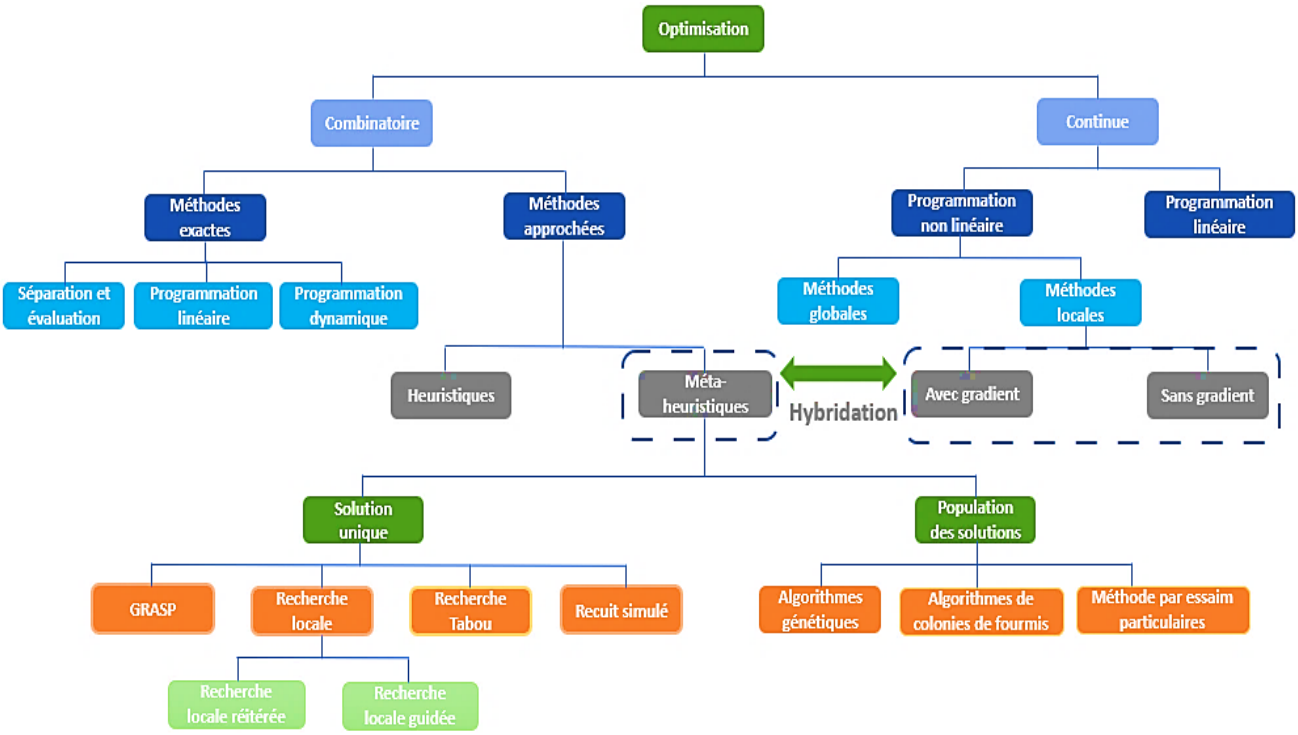

Figure 1.6 : Classification des méthodes d'optimisation mono-objectif

1.2.4.2. Méthodes de résolution multi-objectifs

Les problèmes multi-objectifs existent quand un compromis entre plusieurs objectifs contradictoires est à rechercher. Étant donné la nature multi-objectifs des milieux industriels où les problèmes d'optimisation sont d'une complexité grandissante rend le développement des outils d'optimisation multi-objectifs crucial à la fois pour les chercheurs et les industriels impliqués dans ces systèmes. Cette importance académique, scientifique et industrielle résultante a fait naître un véritable axe de recherche. Partant de ce fait, les premiers travaux menés sur les problèmes multi-objectifs furent réalisés au 19^{éme} siècle sur des études en économie par Edgeworth et généralisés par Pareto. Leurs intérêts sont nés du fait que la plupart des problèmes d'optimisation réels sont décrits à l'aide de plusieurs critères souvent contradictoires devant être optimisés simultanément. Les problèmes multi-objectifs ont la particularité d'être beaucoup plus difficiles à traiter que leur équivalent mono-objectif. La difficulté réside dans l'absence d'une relation d'ordre total entre les solutions. En effet, la solution d'un problème multi-objectif est un ensemble de solutions compromis entre les différents objectifs à optimiser. L'ensemble des meilleures solutions est appelé le front Pareto. Cet ensemble de solutions constitue un équilibre, dans le sens qu'aucune amélioration ne peut être faite sur un objectif sans dégradation d'au moins un autre objectif. Résoudre un problème d'optimisation multi-objectif peut donc s'avérer long et fastidieux si des méthodes appropriées ne sont pas mises en œuvre. Comme illustré sur la figure 1.7, les approches de résolution des problèmes multi-objectifs peuvent être réparties en quatre classes suivantes :

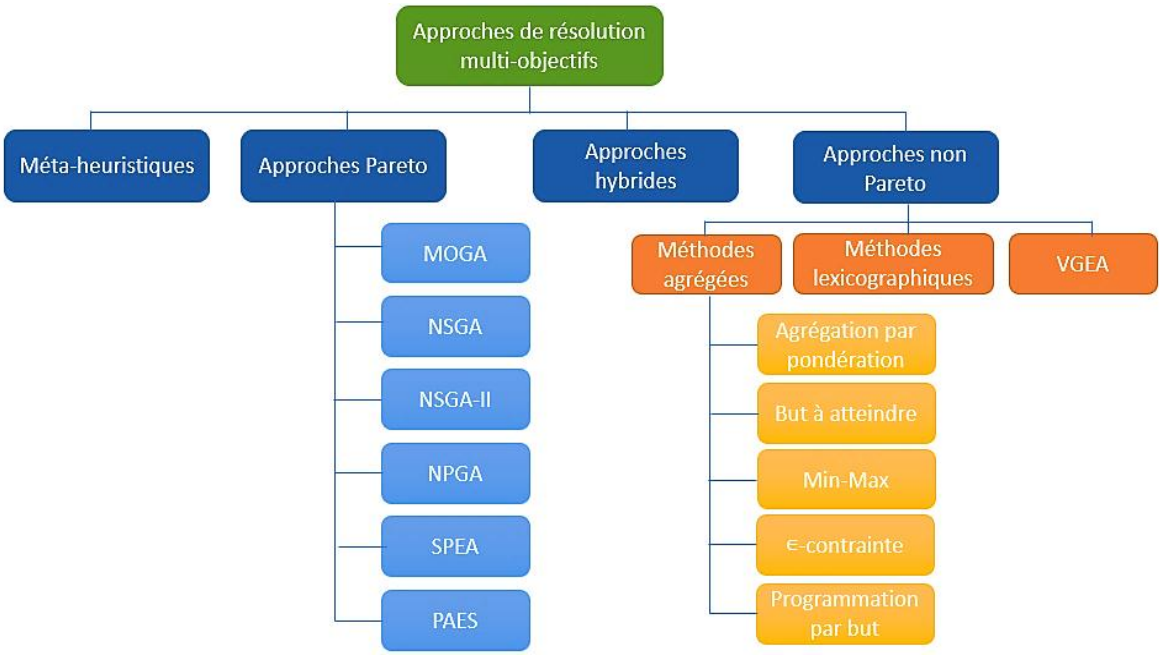

Figure 1.7 : Classification des méthodes d'optimisation multi-objectifs

1.3. Ordonnancement de la production et de la maintenance : nécessité de la coopération

1.3.1. Aléas de l'ordonnancement de la production

Dans la littérature consacrée aux problèmes liés à d'éventuels problèmes d'horaires, la plupart des ressources nécessaires se trouvent dans le contexte de l'exécution des tâches sont disponibles en permanence. Cette hypothèse n'est plus conforme à la réalité des entreprises d'aujourd'hui. Une situation de conflit est apparue entre les fonctions production et maintenance lors de l'introduction de nouvelles méthodes de gestion de la production. Telles que le juste-à-temps ont été introduites. De plus, l'état de

santé des machines se détériore en raison de leur utilisation et de leur vieillissement, ce qui peut entraîner des pannes ou des retards. Des événements imprévus lors de la réalisation des tâches de production entraînant la non-qualité des produits. Pour cette raison, le temps de traitement effectif d'une tâche sera plus long que prévu. Afin de réduire l'effet de la détérioration des machines, une stratégie optionnelle consiste à l'entretien des machines aux meilleurs moments, ce qui améliorera l'efficacité des machines en le ramenant à son état opérationnel [YIN, 2017]. Afin de garantir un plan de production efficace et robuste, il est important d'intégrer la maintenance dans le processus de production au niveau de l'ordonnancement provisoire pour non seulement planifier l'exécution des tâches de production mais aussi anticiper les pannes et planifier les activités de maintenance sur les machines. La coopération entre la maintenance et la production doit garantir que la planification de la production laisse le temps à la maintenance d'intervenir, que le service de maintenance exerce ses activités au bon moment et réagit rapidement aux pannes de machines. Selon une étude statistique présentée dans [BUZ, 1978], deux types de défaillances de machines sont identifiés :

- Les défaillances dépendantes du temps, qui dépendent du temps écoulé et sont indépendantes de la charge de la machine, de sorte qu'une machine peut tomber en panne même si elle n'a pas été utilisée,
- Les défaillances dépendantes du fonctionnement, également appelées défaillances progressives, qui dépendent du temps d'utilisation d'une machine.

Selon cette étude, les pannes dépendantes de l'exploitation sont les plus courantes et représentent plus de 70 % des interruptions de production. En effet, une comparaison analytique entre les deux types de pannes et leur impact sur la productivité du système de production, réalisée par [MOU, 2006], montre que les pannes des équipements sont généralement liées à leur utilisation. Pour cette raison, les modèles de pannes dépendantes de l'exploitation pour les systèmes de production réels sont considérés comme plus réalistes que ceux des pannes dépendantes du temps. Cependant, les défaillances dépendantes des opérations conduisent souvent à des modèles délicats plus difficile à étudier.

1.3.2. Stratégies de maintenance

La maintenance est définie selon l'AFNOR par la norme NF EN 13306 (avril 2001) en tant que « Ensemble de toutes les actions techniques, administratives et de management durant le cycle de vie d'un bien, destinées à le maintenir ou à le rétablir dans un état dans lequel il peut accomplir la fonction requise ». De plus, la maintenance occupe une place importante dans l'entreprise, elle ne se limite pas à la réparation classique des équipements en cas de panne. Cela s'inscrit dans le cadre de participation à l'augmentation des performances de l'entreprise. La maintenance a évolué à partir de l'évolution de l'industrie, elle a passé du concept entretien à la maintenance. Tout en reconnaissant le fait que la maintenance est devenue aussi une fonction principale dans l'entreprise, toujours accompagnée à la fonction production. De ce fait, le rôle de la maintenance permet de :

- Réduire la fréquence des pannes ;
- Améliorer la disponibilité des outils de production ;
- Améliorer la sûreté ;
- Accroître la disponibilité et réduire les coûts.

1.3.2.1. Types de maintenance

Dans les années 1960, la principale mission du service de maintenance d'une entreprise était d'intervenir sur les équipements en panne et de les réparer le plus rapidement possible [DIE, 2010]. Ces interventions, appelées maintenance corrective, ont ensuite été progressivement complétées par une approche plus anticipative des phénomènes de panne, c'est-à-dire par une maintenance effectuée avant

que l'échec ne se produise. Ces deux principaux types de maintenance, corrective et préventive, présentent quelques variations, comme le montre la figure 1.8.

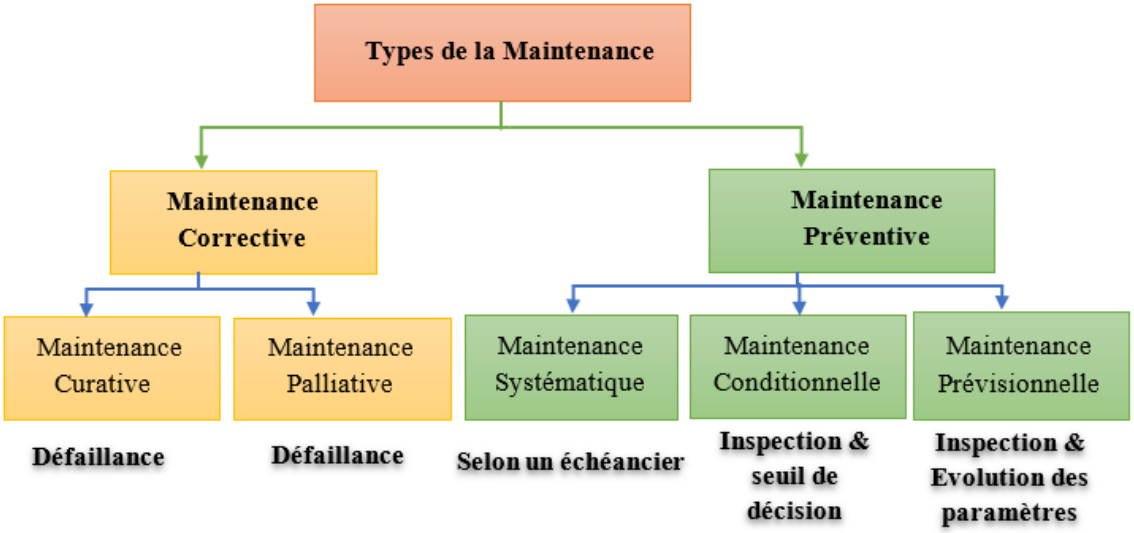

Figure 1.8 : Classification des types de maintenance

L'objectif de la **maintenance préventive** est de réduire la probabilité de défaillance ainsi que de retarder la dégradation du système de production. La première catégorie se divise principalement en maintenance systématique, conditionnelle et prévisionnelle (figure 1.9).

- *Maintenance préventive systématique* : les actions de maintenance préventive sont réalisées dans des intervalles du temps prédéterminés. Ce type d'action se fait selon un calendrier sans contrôle préalable de l'état du système.
- *Maintenance préventive conditionnelle* : ce type de maintenance est basé sur la surveillance, en suivant les paramètres de dégradation mesurée caractérisant le système. L'action de maintenance préventive conditionnelle est effectuée uniquement lorsque les paramètres de dégradation atteignent un niveau critique.
- *Maintenance prévisionnelle* : l'action de maintenance prévisionnelle est une action de maintenance conditionnelle avec des prévisions obtenues à l'aide d'évaluation des paramètres de dégradation du système.

La **maintenance corrective** est exécutée après la détection d'une panne. On distingue deux types : maintenance corrective palliative et maintenance corrective curative (figure 1.9).

- *Maintenance corrective palliative* : l'action de maintenance consiste à une réparation provisoire. Ce type de maintenance est réalisé lorsque la défaillance empêche de poursuivre l'exploitation du système de production.
- *Maintenance corrective curative* : ce type de maintenance permet de réparer le système à son état de fonctionnement nominal, en supprimant tout dysfonctionnement.

1.3.2.2. Objectifs de l'ordonnancement de maintenance

Dans le cadre de l'ordonnancement de la maintenance, les objectifs sont fixés à condition qu'un grand nombre de contraintes hétérogènes soient satisfaites. Celles-ci comprennent, entre autres, la dépendance de l'ordonnancement de la maintenance à la production, les arrêts de production, le taux d'utilisation des

équipements, etc…Les objectifs de l'ordonnancement de la maintenance peuvent être décomposés de manière hiérarchique en objectifs internes et objectifs externes (figure 1. 9) [COU, 2000].

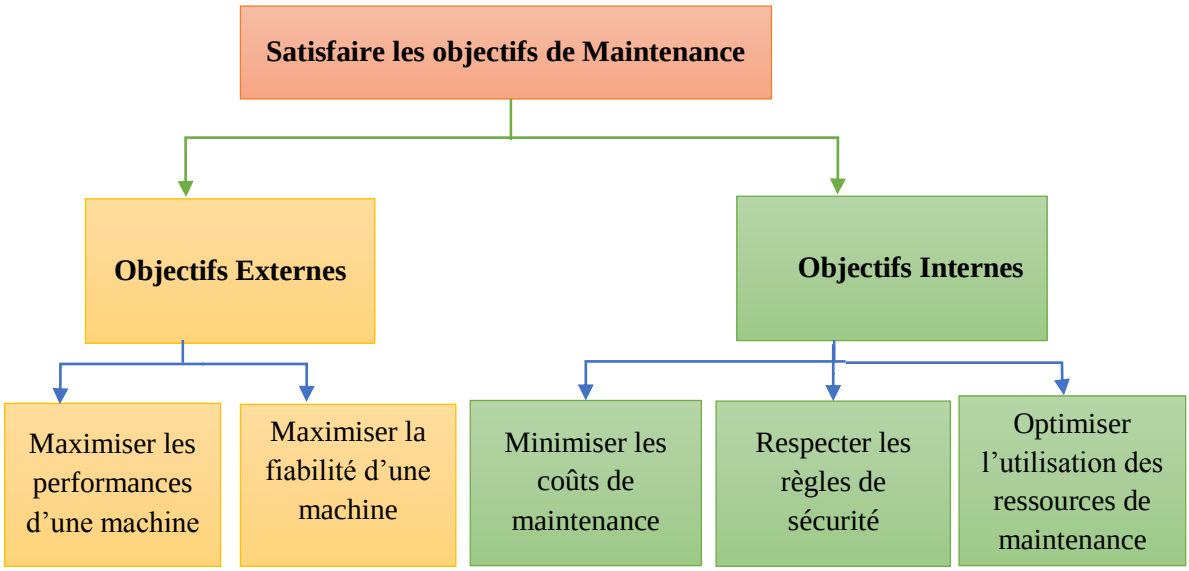

Figure 1.9 : Structure hiérarchique des objectifs de l'ordonnancement de la maintenance

Dans le cadre des objectifs internes, le département de maintenance se charge de son propre fonctionnement et les objectifs externes sont imposés par les autres départements, notamment par la production. Par leur nature, ils peuvent être conflictuels. De fait, leur satisfaction nécessite des interventions à des dates bien étudiées qui peuvent être loin d'être optimales.

1.3.3. Stratégies de l'ordonnancement de la production et de la maintenance

Dans la littérature, trois stratégies d'ordonnancement de la production et de la maintenance ont été identifiées : les stratégies d'ordonnancement séparées, séquentielles et intégrées [LEE, 2000]. Ces stratégies visent à résoudre, aussi efficacement que possible, les conflits structurels qui existent entre les activités des différents départements.

1.3.3.1. Stratégie de l'ordonnancement séparé

Dans l'état actuel du développement, les activités de maintenance et de production sont généralement gérées de manière indépendante au sein de l'entreprise [BEM, 2002]. Ainsi, leur ordonnancement est effectué séparément et interfère souvent entre eux, ce qui conduit à des retards dans la production ou la maintenance. Cette méthode implique la mise en place d'une communication accrue entre les départements de maintenance et de production afin de limiter les conflits dans l'immobilisation des ressources humaines et matérielles (figure 1.10).

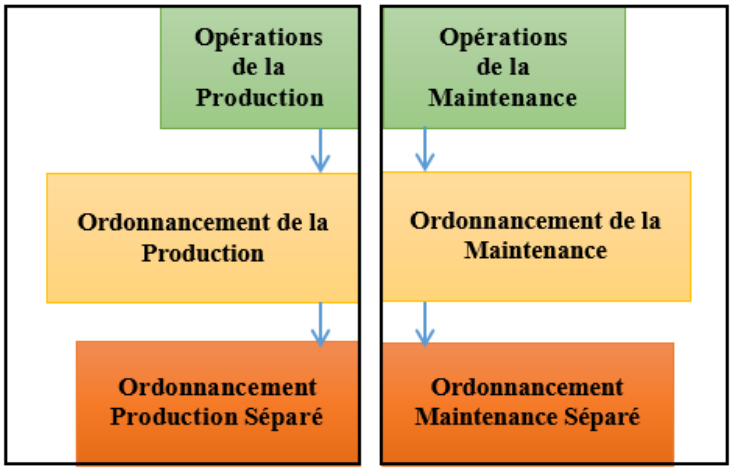

Figure 1.10 : Ordonnancement séparé

1.3.3.2. Stratégie de l'ordonnancement séquentiel

Ce type de politique consiste à ordonnancer les deux activités, la maintenance ou la production, tout en utilisant cet ordonnancement comme une contrainte supplémentaire d'indisponibilité des ressources pour résoudre le problème d'ordonnancement des deux types de tâches (figure 1.11). Dans la plupart des cas, la maintenance est planifiée en priorité, tandis que la planification de la production est réalisée en considérant les opérations de maintenance comme une contrainte importante en termes d'indisponibilité des ressources [AGG, 2002].

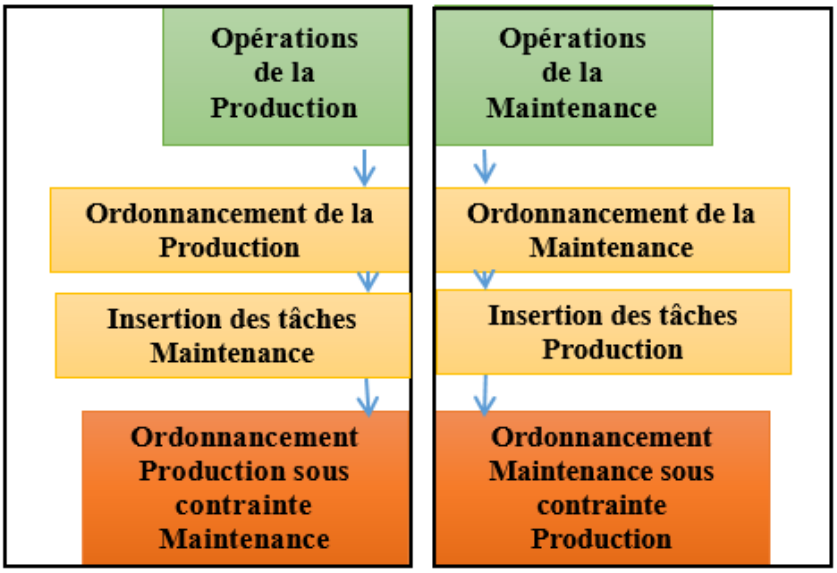

Figure 1.11 : Ordonnancement Séquentiel

1.3.3.3. Stratégie de l'ordonnancement intégré

Cette stratégie repose sur la création d'une programmation conjointe et simultanée des tâches de maintenance et de production [BRA, 1996] (figure 1.12). Cette politique de planification limite les risques d'interférence entre la production et la maintenance et optimise ainsi la qualité de la planification, étant donné la différence de caractérisation des tâches de maintenance et de production. Elle permet néanmoins de garder optimiste qu'un jour les conflits dans l'utilisation des ressources

disparaîtront, mais elle implique la fusion des deux départements de production et de maintenance. En outre, un nombre important de problèmes est posé par la différence de caractérisation entre les tâches de maintenance et de production. Les premières ont souvent une date de début au plus tard des risques éligibles et n'ont pas un temps de fonctionnement précisément connu mais seulement un temps de fonctionnement moyen (MTTR). Les secondes, en revanche, sont caractérisées par une date de début au plus tôt, une date d'expiration et un temps de fonctionnement fixe. Ce sont autant d'obstacles à une planification conjointe aisée de ces deux types d'activités.

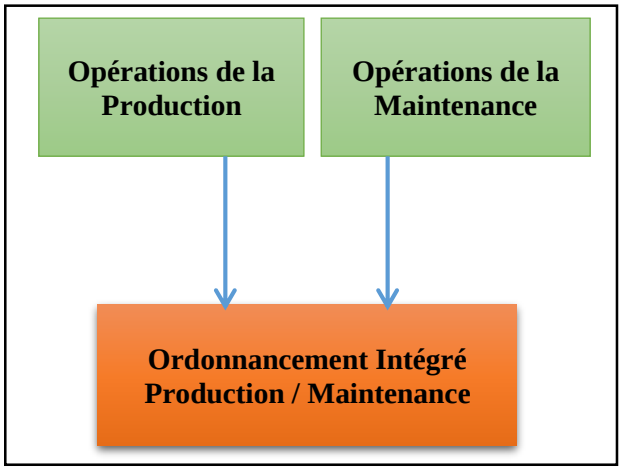

Figure 1.12 : Ordonnancement Intégré

En ordonnançant simultanément les tâches de production et de maintenance préventive, la productivité de l'entreprise sera certainement améliorée et les conflits inhérents à la nature et aux objectifs de ces deux fonctions seront éliminés.

1.3.4. Intérêts de l'ordonnancement simultané de la production et de la maintenance

Actuellement, la stratégie d'ordonnancement séparée est le plus souvent traitée de manière indépendante au sein des entreprises, ce qui consiste à planifier séparément les tâches de maintenance et les tâches de production [SAD, 2018a]. Dans le cas de cette stratégie, il y aura nécessairement des retards soit au niveau de la production, soit au niveau de la maintenance. Ceci est un effet défavorable conjointement sur le coût de production, le coût de la maintenance, le délai de livraison ou sur la fiabilité de l'équipement qui peut provoquer des pannes. Cette stratégie nous donne des conflits entre les ressources humaines et matérielles qui existent entre les deux calendriers de production et d'entretien. L'exemple ci-contre illustre ces conflits dans l'atelier flow shop à trois machines (figure 1.13) [SAD, 2018b].

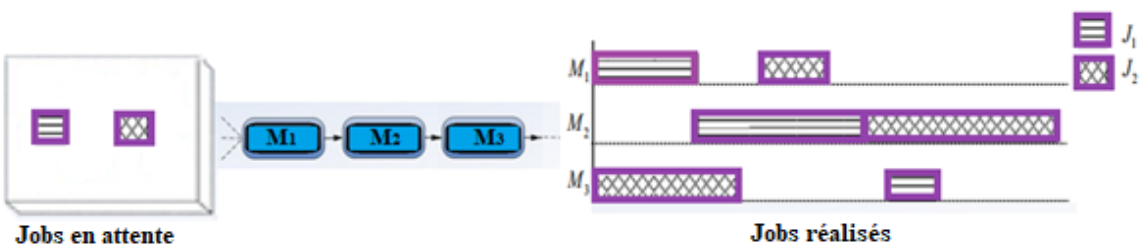

Figure 1.13 : Problème d'ordonnancement flowshop avec trois machines

À titre d'exemple, l'ordonnancement séparé de la production et de la maintenance dans l'atelier de production à trois machines est illustré dans la figure 1.14.

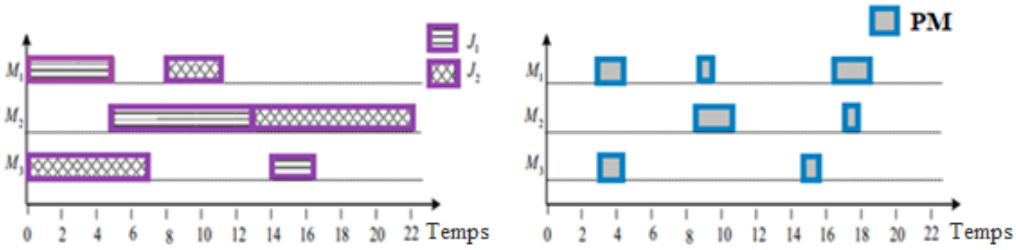

Figure 1.14 : Ordonnancement séparé des tâches de la production et de la maintenance

De fait, la mise en œuvre d'une stratégie d'ordonnancement séparée des tâches de production et de maintenance engendre des contraintes et des conflits multiples, qui sont présentés à la figure 1.15. Pour cette raison, pour résoudre efficacement ces conflits, dans la pratique, une autre stratégie doit être envisagée sur la base de l'expérience acquise.

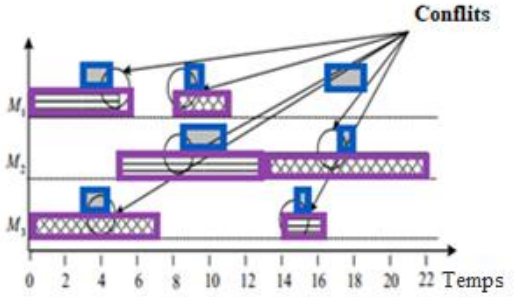

Figure 1.15 : Conflits au niveau d'ordonnancement séparé des tâches de la maintenance et de la production [SAD, 2018b]

Cette intégration de l'ordonnancement de la production et de la maintenance vise essentiellement à réduire le temps d'exécution de toutes les tâches ainsi que les coûts de maintenance et de production. [ALB, 2012] a réalisé une étude sur un système avec des machines parallèles dans l'ordonnancement desquelles ils intègrent les interventions de maintenance préventive. Ces dernières sont planifiées en fonction du temps écoulé entre deux opérations de maintenance successives. Les coûts de la maintenance préventive et ceux induits par les pannes sont connus a priori, les seconds étant bien sûr toujours supposés supérieurs aux premiers. Dans le cas contraire, il ne servirait à rien d'introduire une politique de maintenance préventive. La robustesse d'un ordonnancement conjoint production/maintenance peut être mesurée par sa réactivité à des événements aléatoires tels que les pannes ou par l'observation d'une détérioration d'un équipement induisant des interventions de maintenance corrective ou conditionnelle. Si les indices de fiabilité de l'ordonnancement de chacune des tâches restent dans des proportions acceptables, alors l'ordonnancement est dite robuste [BEN, 2005]. Dans la perspective visée précédemment, cette étude a pour objectif de positionner et de mettre en valeur l'importance de la fonction de maintenance dans le système de production. De ce fait, dans ce contexte, la fonction de maintenance est étroitement liée à la fonction de production. Cependant, leurs objectifs sont antagonistes et exigent les mêmes ressources matérielles. Le problème rencontré par les deux fonctions concerne l'affectation de toutes les tâches de production et de maintenance aux ressources machines et nécessite un compromis entre les deux. Il en résulte que la séparation des tâches de production et de maintenance génère des conflits qui vont à l'encontre de la performance optimale

des ressources machines, y compris leur disponibilité. Pour une meilleure cohérence entre les deux fonctions, et afin d'éviter et de prévenir les conflits, le concept d'intégration s'avère indispensable.

1.4. Ordonnancement sous contraintes d'énergie

Dans le contexte de la mondialisation, la question du changement climatique est un enjeu majeur qui nous préoccupe davantage et la protection de l'environnement constitue un sujet de réflexion important. De fait, cette préoccupation se manifeste sous plusieurs formes, dont la réduction de la consommation d'énergie. Récemment, divers travaux et conférences sur l'environnement et l'énergie ont été organisés. Par ailleurs, la réduction de la consommation d'énergie et des émissions de gaz à effet de serre a été fortement recommandée car, au cours des dernières années, les émissions de gaz à effet de serre ont considérablement augmenté. Ainsi, le secteur industriel est un grand consommateur d'énergie et est responsable d'un tiers des émissions totales de gaz à effet de serre [YON, 2013]. Partant de ce constat, il est vivement recommandé de se concentrer sur le secteur industriel pour le contrôle et la réduction de la consommation d'énergie et la minimisation des coûts de production. En revanche, la prise de décision au niveau de la chaîne de production est liée aux horizons temporels d'ordonnancement. Dans cette étude, nous nous concentrons sur l'intégration de l'aspect énergétique à court terme. Au niveau opérationnel, les décisions sont prises en matière d'ordonnancement des opérations, de main-d'œuvre et d'équilibrage des stocks. À ce niveau, plusieurs projets de recherche ont intégré l'aspect énergétique dans leurs modèles. Dans ce sens, une répartition des travaux intégrant l'aspect énergétique soit en termes de coût, soit en termes de consommation.

1.4.1. l'intégration du coût énergétique

D'après [RUN, 2016], en Europe la demande d'électricité augmentera d'une moyenne de 56% d'ici 2050 avec un taux de croissance annuel de 1,1% [CAP, 2013]. Actuellement les ménagers consomment un pourcentage d'électricité de 12 à 14% et en 2050 il est estimé à 23% [COM, 2011]. Ce qui représente une augmentation remarquable et un danger imminent, d'où l'intérêt de suivre des programmes de réponse à la demande bien maîtrisé. Les programmes de réponse à la demande sont des stratégies économiques et ils concernent l'environnement. Ils visent à équilibrer les demandes aux offres tout en limitant l'énergie. Ces programmes permettent de réduire la consommation énergétique, les coûts de l'exploitation et d'investissement ainsi que les émissions de carbone. Les programmes de réponse à la demande sont classés selon [GOL, 2010], [ZEY, 2014] et [XIN, 2018] en deux grandes catégories comme illustré sur la figure 1.16 :

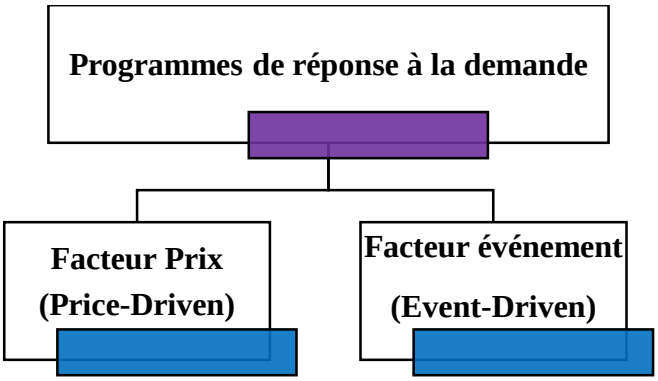

Figure 1.16 : Programmes de réponse à la demande

En ce qui concerne le programme event driven, des récompenses seront accordées aux industriels qui réduisent leurs consommations d'énergie afin de répondre à des événements déclencheurs. Les

événements peuvent se traduire par des changements climatiques, adaptation à des perturbations économiques, dégradation de la fiabilité des équipements, etc.

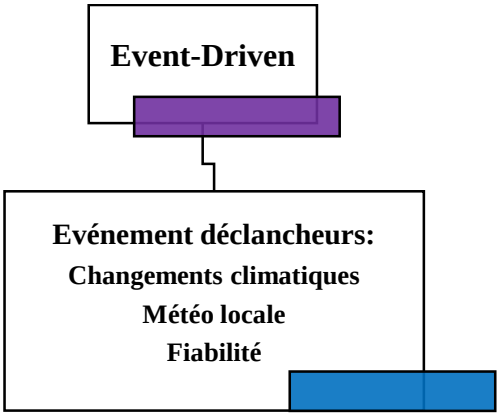

Figure 1.17 : Répartition du programme Event-Driven

Price driven, ou programme de réponse à la demande axé sur le prix, est une stratégie utilisée dans le secteur industriel où le coût de la consommation énergétique est inclus dans le coût total de production ce qui fait qu'une augmentation des coûts d'énergie engendre une flambée des coûts totaux de production. En effet, les entreprises organisent leur production de manière à minimiser les coûts électriques car le coût d'électricité varie dans le temps afin d'encourager les décideurs de changer leurs habitudes de consommation énergétique. Cette catégorie est divisée selon [XIN, 2018] en quatre catégories présentées dans la figure 1.18 :

- Temps d'utilisation (Time-Of-Use TOU) ;
- Prix de pointe critique (Critical Peak Pricing CPP) ;
- Prix de temps réel (Real-Time Pricing RTP) ;
- Prix de temps de pointe (Peak Time Pricing PTP) ;

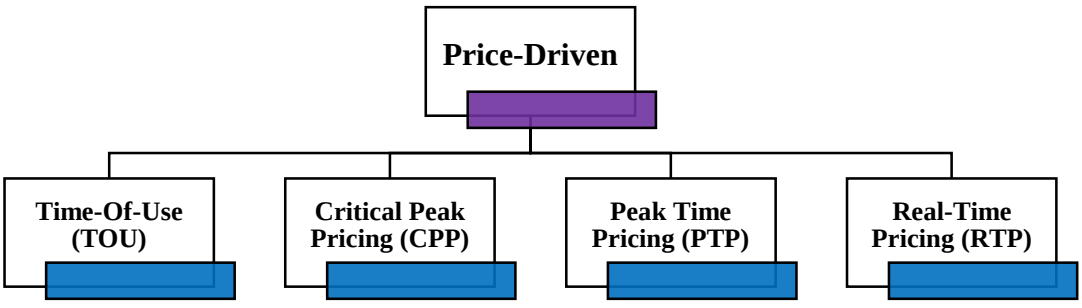

Figure 1.18 : Répartition du programme Price -Driven

Dans de nombreux pays du monde, la tarification de l'électricité en fonction de l'heure de consommation (TOU) a été appliquée pour encourager les fabricants à réduire leur consommation d'électricité des périodes de pointe aux périodes creuses.

Les auteurs [SAD, 2019a] étudient un nouveau modèle d'optimisation des coûts de l'électricité lors de la programmation intégrée des tâches et de la maintenance préventive stochastique dans le cadre du système de tarification de l'électricité en fonction de l'heure de consommation (TOU) dans des machines parallèles non liées, dans lesquelles le prix de l'électricité varie tout au long de la journée. Le problème

réside dans l'affectation d'un groupe de tâches, des intervalles flexibles de maintenance préventive à un ensemble de machines parallèles non liées, puis dans la programmation des tâches et de la maintenance préventive flexible sur chaque machine séparée, de manière à minimiser le coût total de l'électricité.

Selon le protocole (TOU), les redevances d'électricité sont déterminées à l'avance pour chaque période et ne varient que deux fois par an. Afin de réduire le coût de l'électricité, les industries déplacent donc leur consommation d'énergie vers les périodes les moins chères (OFF-PEAK). La tarification aux heures de pointe critiques (CPP) est similaire à la (TOU), sauf qu'il y a quelques jours de pointe critiques où le coût de l'électricité est très bas. (RTP) permet de répartir le coût de l'électricité en fonction de l'élasticité de la demande et de l'offre. Elle permet d'ajuster la consommation d'énergie des consommateurs afin d'obtenir une réduction financière.

1.4.2. l'intégration de la consommation énergétique

Une part importante de l'énergie utilisée dans le secteur manufacturier est actuellement produite par des combustibles fossiles. Par conséquent, dans un avenir prévisible, l'efficacité énergétique deviendra le principal objectif dans le secteur manufacturier, en raison à la fois de la rareté des ressources et de l'augmentation des gaz à effet de serre provenant des processus de production. En termes de fabrication à haut rendement énergétique, la minimisation de la consommation d'énergie, la récupération des composants, la transformation des déchets en ressources clés sont nécessaires pour aligner les processus de fabrication sur les principes de production durable et d'efficacité des ressources. L'augmentation de la consommation mondiale d'énergie, les fortes variations de son coût et les effets de la dégradation de l'environnement sont de bonnes raisons pour que les industries manufacturières deviennent plus écologiques. L'ordonnancement écologique des ateliers de production devient de plus en plus un facteur vital pour le développement durable de l'industrie manufacturière. Les industries sont les principales consommatrices d'énergie. Elles consomment environ la moitié de l'énergie mondiale [MOU, 2007] et émettent un tiers du total des émissions de dioxyde de carbone (CO2). Les industries sont donc soumises à une pression accrue pour améliorer leur consommation d'énergie et réduire leurs effets néfastes sur l'environnement. La filiale industrielle représente un contributeur majeur et signifiant à la consommation énergétique. Tout d'abord, un produit dérive de la transformation de la matière première sur une machine consommant de l'énergie. En effet, l'énergie est un enjeu écologique et économique et la consommation énergétique représente une part importante du coût total de production. Ainsi, la fabrication d'un produit nécessite l'allocation d'un ensemble de consommation. De ce fait d'après [JER, 2012], nous pouvons distinguer différentes sources de consommation énergétique en fonction de la nature du consommateur et la cause de la consommation (figure 1.19).

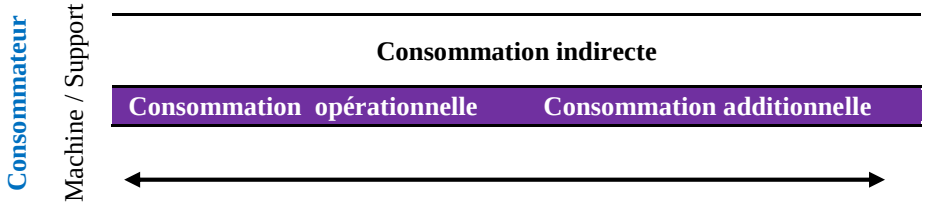

Figure 1.19 : Sources de consommation énergétique

- La consommation indirecte correspond à l'énergie dépensée au cours des processus de production pour la réalisation des opérations. Les niveaux de dépense en énergie indirecte sont obtenus par des analyses de cycle de vie (ACV).
- La consommation opérationnelle correspond à l'énergie utilisée par la machine et attribuée directement au produit. C'est le mode productif de la machine.
- La consommation additionnelle est la part d'énergie consommée par la machine et qui est allouée non seulement à un produit mais entre les produits. C'est le mode non productif de la machine.

1.5. Problématique et orientation de l'activité de recherche : État de l'art

De nos jours, l'ordonnancement constitue un élément organisationnel de l'entreprise qui ne nécessite pas d'investissements importants [GAH, 2016].

Au sein du secteur manufacturier, la gestion opérationnelle détermine la demande en énergie des usines de production et ce, à différentes périodes. Ainsi, le processus de planification peut être une méthode appropriée pour améliorer l'efficacité énergétique dans les usines de fabrication. Diverses techniques d'économie d'énergie sont examinées par les chercheurs, telles que l'arrêt des machines pour réduire la consommation d'énergie hors processus, la sélection de la vitesse des machines pour contrôler la consommation d'énergie de processus, et le changement de tâches pour réduire la demande de pointe. En plus des objectifs liés à la production tels que la durée d'exécution, le retard et la durée totale de traitement, les chercheurs considèrent les objectifs liés à l'énergie tels que les coûts d'électricité et les pénalités d'émission de gaz comme faisant partie des questions d'efficacité énergétique liées à la programmation. En outre, les entreprises manufacturières doivent choisir l'un des types de programmes de réponse à la demande proposés par les fournisseurs d'énergie. Dans ce contexte, l'un des plus connus est le tarif en fonction de l'heure de consommation (TOU), qui est proposé par de nombreuses compagnies d'électricité [WAN, 2013]. Dans le cadre du tarif TOU, le prix de l'électricité est plus élevé pendant les périodes de pointe, alors qu'il est plus bas pendant les périodes creuses. Dans la mesure où l'entreprise opte pour le traditionnel tarif forfaitaire TOU, de nouvelles opérations de gestion doivent être planifiées afin de s'adapter au nouveau tarif. Cependant, les recherches sur la combinaison des techniques d'économie d'énergie et des tarifs des TOU sont assez limitées dans la littérature.

Cependant, l'impact de l'ordonnancement de la maintenance doit également être inclus pour coïncider avec la pratique réelle. Il est nécessaire d'effectuer la maintenance périodiquement pendant l'horizon de production pour assurer la fiabilité des machines. La maintenance et la production sont liées, car elles ont toutes deux un impact sur la capacité de la machine. L'intégration entre la programmation de la production et la planification de la maintenance (PSMP), qui ignore l'aspect énergétique, a déjà été étudiée depuis le début des années 1990 [SAD, 2020a]. Ainsi, la machine consomme de l'énergie lors des tâches de traitement, alors qu'elle n'a pas besoin d'énergie pour la maintenance puisqu'elle est arrêtée à ce moment-là. Ainsi, la production, la maintenance et l'énergie sont trois aspects interdépendants dans la gestion des opérations lorsque l'on considère le coût de production et le coût total de l'énergie.

Au cours de la dernière décennie, l'étude des problèmes d'ordonnancement a connu une impulsion très importante. En fait, deux aspects sont pris en compte dans cette étude :

- Le premier est l'intégration d'ordonnancement de la production et de la maintenance. Cette interaction vise à minimiser les objectifs liés au temps de réalisation des tâches (le Makespan) dans le respect des contraintes liée à la maintenance.
- Le deuxième est consacré à un ordonnancement sous contraintes énergétiques en termes de consommation et de coût. Il vise à minimiser les objectifs liés à la consommation d'énergie et aux coûts de l'électricité pour répondre aux besoins de production.

Concernant le premier aspect, les machines ne sont pas disponibles pour traiter les tâches pendant certains intervalles, lorsque la maintenance préventive (PM) est effectuée pour maintenir les machines en bon état. Certains chercheurs ont supposé qu'une machine doit être entretenue après avoir travaillé continuellement pendant un temps maximum autorisé [GRA, 1999] ont proposé un algorithme de programmation dynamique pseudo-polynomial pour minimiser le temps total pondéré d'achèvement en supposant qu'il y avait au maximum deux intervalles non disponibles. Les auteurs [MOS, 2009] ont proposé une dynamique pseudo-polynomiale et une heuristique simple pour minimiser le temps total de réalisation pondéré en supposant qu'il n'y ait qu'un seul intervalle non disponible. Certains chercheurs ont supposé que les PM doivent être effectuées à des intervalles prédéfinis. Lorsqu'une seule PM doit être exécutée dans un intervalle prédéfini [u, v]. Les auteurs [CHE, 2006a] ont développé quatre programmations binaires mixtes en nombres entiers pour minimiser le retard total. Les auteurs [YAN, 2011] ont calculé le taux d'erreur de l'algorithme SPT et a développé une programmation dynamique et une branche pour minimiser le temps total de réalisation. Au moment où plusieurs PMs ont été prises en compte, Les auteurs [CHE, 2006b] ont développé quatre modèles mixtes de programmation en nombres entiers binaires afin de minimiser le temps moyen d'écoulement.

Dans cette revue de littérature, au total 88 articles publiés jusqu'à 2021. Ils ont été identifiés en se concentrant sur l'analyse et la solution du problème d'ordonnancement des tâches de la production avec la prise en compte des périodes d'indisponibilité fixe et flexible. Parmi ceux-ci, 41 articles étudient les problèmes d'ordonnancement des tâches la production avec la présence des périodes d'indisponibilité flexible, tandis que la majorité des 46 articles traitent des problèmes flow shop d'ordonnancement des tâches la production avec la présence des périodes d'indisponibilité fixées à l'avance et un seul article traite les problèmes flow shop d'ordonnancement des tâches la production avec des périodes d'indisponibilité fixées à l'avance et flexible. La figure 1.20 montre l'évolution des publications par an, caractérisé par un nombre croissant de publications depuis le début des années 1989 jusqu'à 2021 [SAD, 2018b]. Bien que le nombre de publications soit presque invariable depuis quelques années, la recherche sur le type d'atelier de production a tendance à progresser et à évoluer en raison des problèmes liés à l'ordonnancement des tâches de la production et de la maintenance.

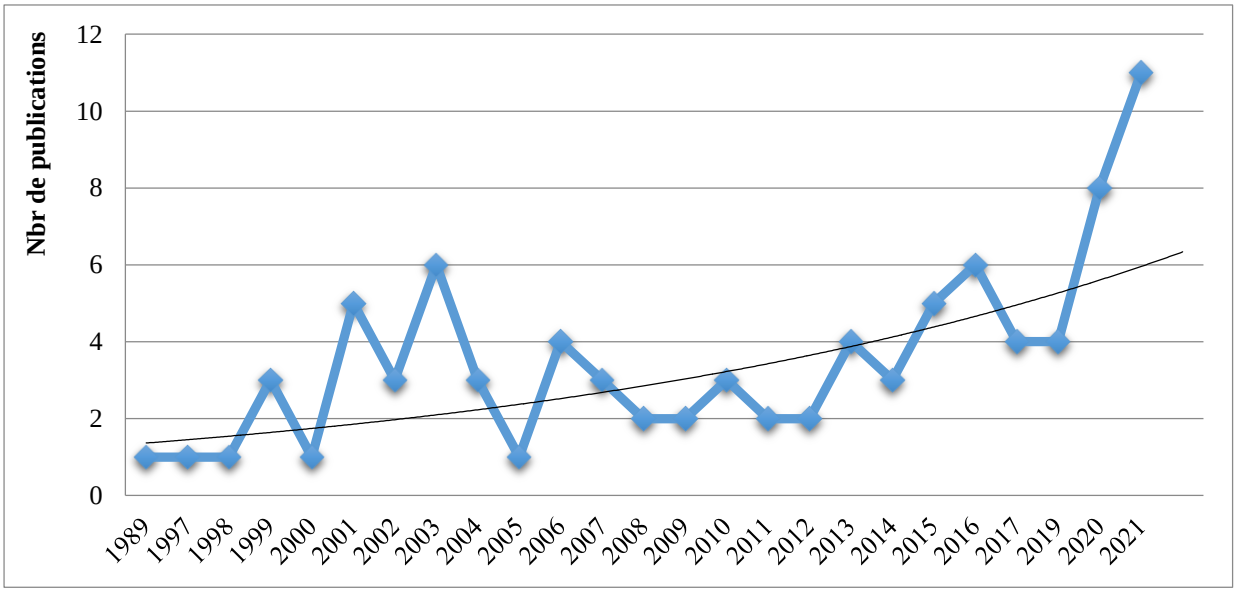

Figure 1.20 : Évolution des publications des problèmes d'ordonnancement de la production et de la maintenance

Relativement aux critères d'optimisation adoptés dans la littérature, comme le précise la figure 1.21, il est évident que le makespan Cmax est le plus souvent étudié dans la littérature, suivi par les deux

critères d'optimisation le retard Tmax et le coût total lié à la production et/ou à la maintenance TC. Vient ensuite, le critère F qui minimise les périodes d'indisponibilité et le critère ∑ Ci qui minimise la somme des dates de fin des opérations (flow time). Ainsi, le critère Emax qui minimise les avances, le critère Lmax qui minimise le retard algébrique. Quant à la somme pondérée des dates de fin ou flow time pondéré ∑ wiCi , il se manifeste dans 1% des documents trouvés .Idem pour le makespan attendu Z1 et l'écart total entre les heures de début des jobs Z2.

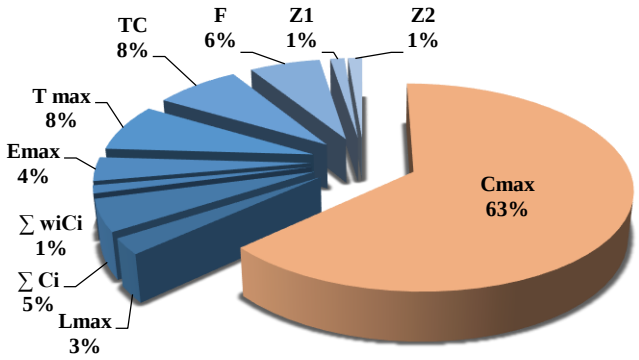

Figure 1.21 : Pourcentage des critères d'optimisation adoptés dans la littérature

En ce qui concerne les méthodes introduites pour la résolution des problèmes flow shop d'ordonnancement des tâches de la production avec la présence des périodes d'indisponibilité, notre revue a montré que les méthodes approximatives sont les plus utilisables pour la résolution des problèmes flow shop d'ordonnancement des tâches de la production avec des périodes d'indisponibilité. Elle a été notée que les méthodes approximatives sont présentes dans 80% de la documentation trouvée et les méthodes exactes apparaissent dans 20 %. La figure 1.22 montre ces pourcentages de publications et la figure 1.23 montre les pourcentages de publications par type de méthode adoptées pour les problèmes flow shop d'ordonnancement des tâches de la production avec des périodes d'indisponibilité.

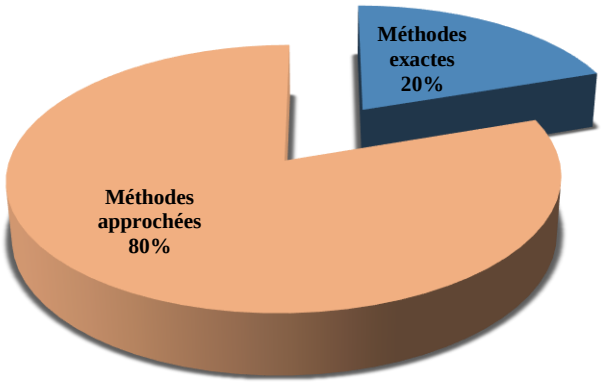

Figure 1.22 : Pourcentage des méthodes exactes et approchés

Donc, on conclut que la majorité des auteurs visent à donner la meilleure solution possible même si en dépit de l'optimalité. Selon la Figure 1.23, la méthode la plus répandue est celle du HM (Heuristic Methods), notre analyse a permis de détecter qu'elle représente presque tout le pourcentage total de 32% des méthodes mentionnées ci-dessus. Il vient ensuite la méthode GA (Genetic Algorithm) qui représentent un ratio de 25%. Quant à les méthodes exactes, les DP (Dynamic programming) sont plus

développées, la méthode des B&B (Branch and Bound) et la méthode LP (MIP : Mixed integer programming) qui représentent des ratios successivement de 8%, 6% et 4%. Les méthodes SPT(Shortest processing time rule) et les SA (Simulated Annealing) s'approprient le même ratio 3% et également pour les méthodes TS (Tabu Search), LS (Local Search), ACO (Ant Colony Optimization), PSO (Particle Swarm Optimization) et ICA (Imperialist competitive algorithm) qui représentent le même ratio de 2%. le dernier fragment est présenté 1% pour les deux méthodes approximatives GH (Greedy Heuristic) et VNS (Variable Neighborhood Search).

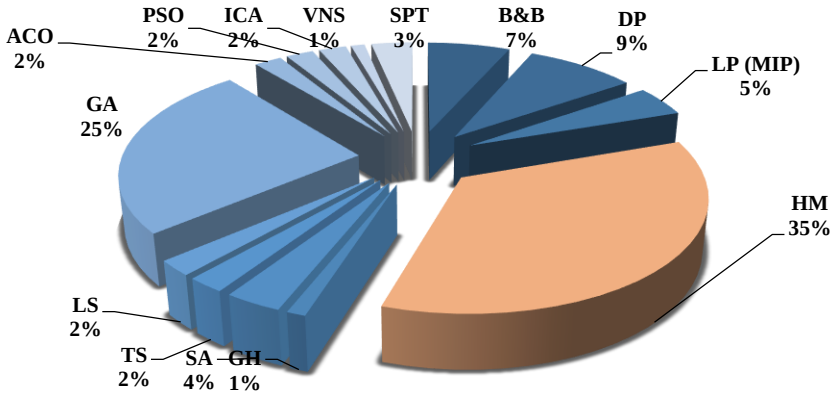

Figure 1.23 : Pourcentage de publications par type de méthode adoptée

Il est également intéressant de fournir quelques informations bibliométriques sur la littérature pour traiter les problèmes d'ordonnancement des tâches de la production avec la présence des périodes d'indisponibilité. Les informations pertinentes comprennent la liste des revues dont les articles sur le sujet ont été publiés, la fréquence de publication et leur impact. Ce dernier, centre son attention sur le nombre de citations rapportées par Google Scholar. Les journaux les plus pertinents concernant le nombre de publications sur les problèmes d'ordonnancement des tâches de la production avec la présence des périodes d'indisponibilité sont présentés à la figure 1.24 qui montre tous les journaux qui ont publié un ou plusieurs articles examinés dans ce travail. Nous pouvons voir que les conférences internationales ont été le débouché pour 15% de tous les articles dans le domaine. Quant aux journaux, la majorité des recherches sur ces problèmes sont publiée dans International Journal of Production Economics qui représentent un ratio de 12%. Le journal « Computers and Operations Research » qui correspondent à un pourcentage de 9% et après les journaux « International Journal of Production Research,Information Processing Letters, Computers and Industrial Engineering et European Journal of Operations Research » qui représentent le même ratio de 6%. Ensuite, les deux journaux « Operations Research, Operations Research Letters» représentent également le même ratio de 5% et le journal « Naval Research Logistics » qui représente un ratio de 3%. Le dernier fragment présente 2% pour les journaux « J.Math Computer Sci., Journal of Cleaner Production, Journal of Industrial and Production Engineering, International Journal of Computer Integrated Manufacturing, Reliability Engineering and System Safety, International Journal of Systems Science, International Journal of Advanced Manufacturing Technology, Journal of Manufacturing Systems, Optimization Letters, Applied Soft Computing, 4OR - Q. J. Oper. Res, A Quarterly Journal of Operations Research, Journal européen des systèmes automatisés, Journal of the Operational Research Society, Omega, International Transactions in Operational Research et Acta Informatica».

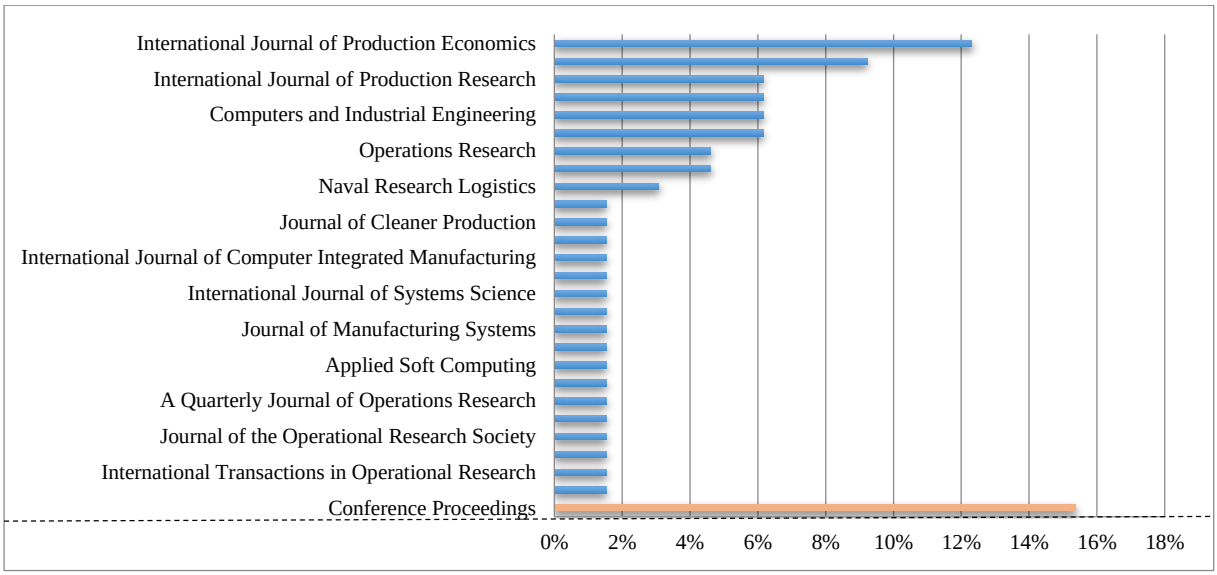

Figure 1.24 : Publications des articles par journal

Dans le second aspect, l'industrie manufacturière écologique a suscité de nombreuses inquiétudes face au changement climatique et au réchauffement de la planète provoqué par les rejets excessifs de gaz à effet de serre, en particulier le dioxyde de carbone (CO2). Face aux taxes élevées de protection de l'environnement et à la législation stricte du gouvernement, il est urgent que les entreprises manufacturières trouvent des moyens efficaces sur le plan énergétique pour réduire leurs émissions de carbone et ainsi ralentir le réchauffement climatique.

En vue de répondre à l'exigence d'économie d'énergie, plusieurs études ont été réalisées. Dans la plupart des études antérieures, la méthode adoptée était simple, à savoir éteindre une machine lorsqu'elle ne fonctionne pas. Par exemple, les auteurs [MOU, 2007] ont constaté que l'on pourrait réaliser des économies d'énergie considérables si l'on éteignait les machines sans goulot d'étranglement lorsqu'elles sont au repos. Sur la base de cette découverte, ils ont proposé un cadre de mise en marche et d'arrêt pour minimiser la consommation d'énergie et le temps total d'exécution pour un problème d'ordonnancement à une seule machine. Au cours de leurs travaux ultérieurs [MOU, 2008], le présent cadre a encore été étendu en appliquant un seuil de rentabilité le concept de durée, c'est-à-dire éteindre la machine si le temps d'inactivité était plus longue que la durée du seuil de rentabilité, sinon, laissez le moteur tourner au ralenti. Les auteurs [PAC, 2014] ont développé une approche d'ordonnancement réactive pour les systèmes de fabrication flexibles. Dans leur méthode, le système de production flexible consiste à couper l'alimentation électrique en cas d'absence de produit dans une période donnée et à la rétablir en période creuse. En outre, les auteurs [WUS, 2018] ont proposé un algorithme génétique de tri non dominé d'économie d'énergie (NSGA) pour déterminer quand mettre en marche/arrêter les machines et quel rapport de vitesse de traitement adopter au sein de l'atelier flexible job shop d'ordonnancement La stratégie d'activation et de désactivation pourrait être efficace dans la minimisation de l'énergie. Cependant dans la pratique, pour de nombreuses entreprises de fabrication en continu industries, les machines doivent être maintenues en mode de veille même si est en cours de traitement en cas de commandes urgentes. À cet égard, de nombreux chercheurs partent du principe que les machines ne doivent pas être complètement éteintes une fois qu'elles sont en marche, mais qu'elles peuvent fonctionner à des vitesses différentes lorsqu'elles traitent des tâches différentes ou rester en mode veille afin d'économiser l'énergie. L'une des méthodes les plus courantes utilisées dans le cadre de la recherche sur ce thème est l'hypothèse qu'une vitesse plus élevée pourrait réduire le temps de traitement tout en entraînant une plus grande consommation d'énergie [FAN, 2013]. Pour résumer, la littérature sur les

problèmes d'ordonnancement liés aux différentes vitesses de traitement peut être classée en deux catégories. Le premier celles qui se concentrent sur des vitesses de traitement continu qui peuvent être modifiées à volonté dans une fourchette limitée ; tandis que les seconds portent sur des vitesses dans lesquelles seuls plusieurs rapports de vitesse prédéfinis sont sélectionnables.

Cependant, dans la plupart des applications du monde réel, il est peu pratique pour la vitesse de traitement à fixer arbitrairement, qui peut être contrôlé en réglant une machine sur différents modes de traitement. En d'autres termes, la vitesse de traitement est limitée à quelques valeurs discrètes. Étant donné que face à cette situation, les auteurs [FAN, 2011] ont présenté un modèle de programmation linéaire à nombres entiers mixtes (MILP) multi-objectifs pour un problème d'ordonnancement d'atelier flow shop pour minimiser la demande de pointe et le makespan, dans lesquelles la vitesse de traitement pourrait être fixés à différents niveaux. Dans leurs derniers travaux [FAN, 2013], deux modèles MILP et un cadre de mise à l'échelle de la vitesse ont été proposés pour un problème de programmation des ateliers de permutation flow shop avec une restriction la consommation électrique de pointe. Les auteurs [CHE, 2015] ont mis au point deux modèles de MILP modèles pour un seul problème d'ordonnancement des machines à plusieurs vitesses pour minimiser la consommation d'énergie avec un retard maximum limité.

Dans le secteur industriel, plusieurs chercheurs se sont intéressés au programme de réponse à la demande "Price driven" en vue d'optimiser leurs ressources et améliorer leurs revenues. [FER, 2013] ont mis en place une méthode d'inventaire du stock tampon nommée 'Just for Peak' qui permet de réduire la demande de la puissance pendant les périodes de pointe sans exposer le système à l'usage des systèmes de production atypique. [WAN, 2013] ont proposé une nouvelle approche d'ordonnancement de production afin que le système de production puisse répondre rapidement et efficacement au profil de tarification en fonction du temps d'utilisation (TOU). Quant à [ASH, 2006] et [ASH, 2001], ils ont élaboré un modèle mathématique d'ordonnancement pour le cas des usines d'acier et de farine, qui permet de fournir des résultats optimaux avec des coûts énergétiques très bas. Finalement, [BEG, 2013] ont mis au point une méthodologie qui permet d'appliquer le CPP qui a été offert par San Diego Pasific Gas and Electric (PG&E) pour les entreprises de production.

Pour la 2-ème catégorie "Event driven", les entreprises qui visent à minimiser leur consommation d'énergie face au changement climatique, à la dégradation et aux perturbations sont récompensées par l'état. Quoi que l'application de cette catégorie de programme de réponse axé sur évènement reste limitée à des ateliers de production à machine unique et n'accorde aucune attention aux ateliers à machines multiples [CHA, 2005] et [CHA, 2008]. Cette exclusion ne permet pas d'estimer précisément les pannes et l'état des machines et par conséquent cela conduit à une interconnexion élevée entre les machines [LEW, 2007].

Au regard des méthodes décrites dans [FAN, 2013], [WAN, 2019] les travaux réalisés dans la présente étude sont orientés vers les économies d'énergie et d'électricité en mettant en œuvre plusieurs techniques d'économie d'énergie en termes de consommation et de coût ainsi qu'en tenant compte du fait que les machines doivent être entretenues périodiquement sur la base de deux types de programmation intégrée des tâches de production et de maintenance de durée fixe et flexible afin de maintenir une grande fiabilité. Le tableau 1.1 présente une synthèse de la littérature examinée, illustrant les divergences entre les différentes références bibliographiques existantes avec les différentes techniques utilisées, notamment :

- PDT : Peak Demand Technique
- SLT : Speed Level Technique
- SMT : Switching On/Off Machine Technique

Tableau 1.1 : Synthèse des publications sur les problèmes d'ordonnancement sous contraintes d'énergie

Références	Années	Ordonnancement des tâches de la production	Ordonnancement des périodes de la maintenance		Objectif	PDT	SLT	SMT
			Fixe	Flexible				
[ABA, 1996]	1996	Oui	Non	Non	Non	Non	Non	Non
[LEE, 1997]	1997	Oui	Oui	Non	Non	Non	Non	Non
[CHE, 2000]	2000	Oui	Oui	Non	Non	Non	Non	Non
[TSE, 2001]	2001	Oui	Non	Non	Non	Non	Non	Non
[KUB, 2002]	2002	Oui	Oui	Non	Non	Non	Non	Non
[BRE, 2004]	2004	Oui	Oui	Non	Non	Non	Non	Non
[ALD, 2004]	2004	Oui	Non	Non	Non	Non	Non	Non
[AGG, 2004]	2004	Oui	Non	Oui	Non	Non	Non	Non
[HAD, 2005]	2005	Oui	Oui	Non	Non	Non	Non	Non
[AGG, 2006]	2006	Oui	Oui	Non	Non	Non	Non	Non
[MOU, 2008]	2008	Oui	Non	Non	Oui	Non	Non	Oui
[HAD, 2010]	2010	Oui	Oui	Non	Non	Non	Non	Non
[CHI, 2011]	2011	Oui	Oui	Non	Non	Non	Non	Non
[RAP, 2013]	2013	Oui	Oui	Non	Non	Non	Non	Non
[FAN, 2013]	2013	Oui	Non	Non	Oui	Oui	Oui	Non
[LIU, 2014]	2014	Oui	Non	Non	Oui	Non	Non	Oui
[TAY, 2014]	2014	Oui	Non	Oui	Non	Non	Non	Non
[LIU, 2014]	2014	Oui	Non	Non	Oui	Non	Non	Non
[LIN, 2015]	2015	Oui	Non	Non	Oui	Non	Non	Oui
[NAG, 2015]	2015	Oui	Non	Non	Oui	Oui	Non	Non
[SHA, 2015]	2015	Oui	Non	Non	Oui	Oui	Oui	Non
[SHO, 2015]	2015	Oui	Oui	Non	Non	Non	Non	Non
[CUI, 2016]	2016	Oui	Non	Oui	Non	Non	Non	Non
[YAN, 2016]	2016	Oui	Non	Non	Oui	Non	Non	Non
[LIU, 2016]	2016	Oui	Non	Non	Oui	Non	Non	Oui
[MAN, 2016]	2016	Oui	Non	Non	Oui	Non	Oui	Non
[DIN, 2016]	2016	Oui	Non	Non	Oui	Non	Oui	Non
[ZHA, 2016]	2016	Oui	Non	Non	Oui	Non	Oui	Non
[DAB, 2016]	2016	Oui	Non	Non	Oui	Oui	Non	Oui
[WAN, 2017]	2017	Oui	Non	Non	Oui	Oui	Non	Oui
[LUC, 2017]	2017	Oui	Non	Non	Oui	Non	Non	Oui
[CHE, 2017]	2017	Oui	Non	Non	Oui	Non	Non	Oui
[LIJ, 2018]	2018	Oui	Non	Non	Oui	Non	Non	Non
[LEI, 2018]	2018	Oui	Non	Non	Oui	Non	Oui	Non
[WUX, 2018]	2018	Oui	Non	Non	Oui	Non	Oui	Oui
[SAD, 2018a]	2018	Oui	-	-	Oui	Non	Non	Non
[SAD, 2018b]	2018	Oui	-	-	Oui	Non	Non	Non
[DAI, 2019a]	2019	Oui	Non	Non	Oui	Non	Non	Non
[DAI, 2019b]	2019	Oui	Non	Non	Oui	Non	Non	Non
[JIA, 2019]	2019	Oui	Non	Non	Oui	Non	Non	Oui
[FUY, 2019]	2019	Oui	Non	Non	Oui	Non	Oui	Non
[LIM, 2019]	2019	Oui	Non	Non	Oui	Non	Oui	Non
[WUX, 2019]	2019	Oui	Non	Non	Oui	Non	Oui	Non
[LUO, 2019]	2019	Oui	Non	Non	Oui	Non	Oui	Non
[WAN, 2019]	2019	Oui	Non	Non	Oui	Oui	Oui	Non
[SAD, 2019a]	2019	Oui	Oui	Oui	Oui	Non	Non	Non
[SAD, 2019b]	2019	Oui	Oui	Oui	Oui	Non	Non	Non
[SAD, 2019c]	2019	Oui	Non	Oui	Oui	Non	Non	Non
[SAD, 2020a]	2020	Oui	Non	Oui	Oui	Non	Non	Non
[SAD, 2020b]	2020	Oui	Non	Oui	Oui	Non	Oui	Non
[SAD, 2020c]	2020	Oui	Non	Oui	Oui	Non	Oui	Non

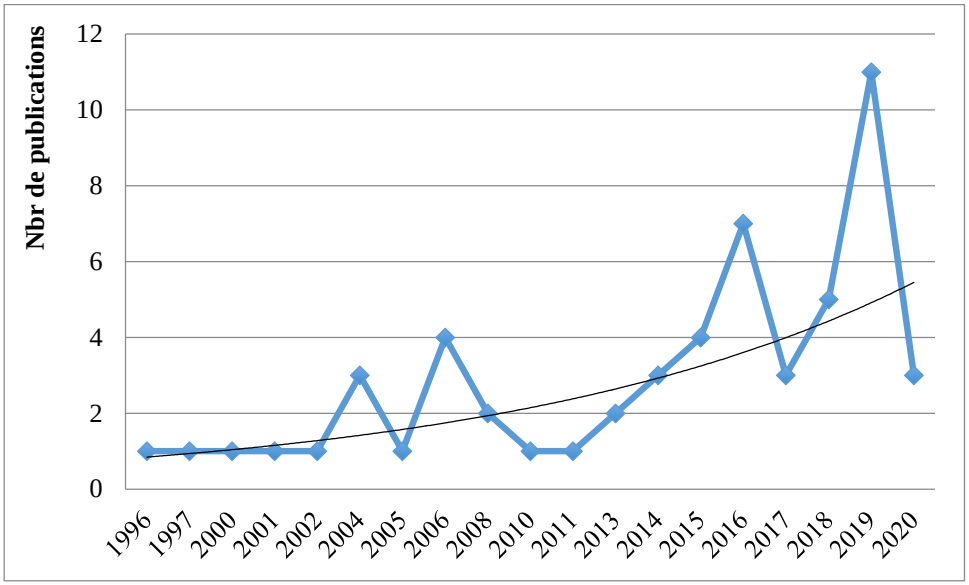

Figure 1.25 : Évolution des publications des problèmes d'ordonnancement sous contraintes d'énergie

La progression exponentielle des publications dans les dernières années révèle que la pertinence de la recherche dans l'optimisation des problèmes d'ordonnancement sous contrainte d'énergie a gagné plus d'attention au fil des années. Comme perspective, les praticiens et les chercheurs de la théorie d'ordonnancement doivent revoir leurs approches de résolution afin de minimiser la consommation d'énergie .

1.6. Objectif général de la thèse

Cette thèse de doctorat est consacrée essentiellement à combiner simultanément les divers aspects relatifs à l'ordonnancement de la production et de la maintenance afin d'améliorer les performances de production autant que de minimiser la consommation énergétique et les coûts d'électricité ainsi que la réduction de la facture énergétique. A ce stade, la préoccupation majeure de cette thèse est l'intégration entre ces multiples objectifs. Ainsi que des orientations de recherches approfondies dans les différents types d'ateliers : « Single Machine, Parallel Machines, Flow Shop,…».

1.7. Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons rappelé les principales caractéristiques des systèmes d'ordonnancement de la production et de la maintenance sous contraintes énergétique et environnementales dans les différents système de production, en passant en revue l'ensemble des critères, contraintes et éléments essentiels à la résolution introduits dans la littérature à ce jour. Nous nous sommes focalisés par la suite sur une classification des problèmes d'ordonnancement d'ateliers en fonction de l'ordre de passage et de l'organisation des systèmes d'une manière générale. En outre, nous avons abordé dans ce chapitre un large pan de méthodes de résolution mono et multi-objectifs mises au point en vue de résoudre les problèmes des systèmes précités. Deux classes sont distinguées pour les problèmes d'ordonnancement mono-objectif, la première permet de fournir une solution optimale dans un temps prohibitif, tandis que la deuxième qui connait un très grand succès dans la littérature permet d'obtenir une solution proche de l'optimum dans un temps d'exécution qui est raisonnable. De même pour les approches dites multi-objectifs, elles sont réparties en plusieurs classes, notamment les approches Pareto, les approches hybrides et les approches non-Pareto. Cette multiplicité d'outils de résolution peut s'expliquer par le

grand gain scientifique porté pour ces systèmes, par la diversité des problèmes qu'ils suscitent ou encore par leur complexité et les défis qu'ils ne cessent de soulever.

Dans la dernière partie de ce chapitre, nous avons effectué une étude bibliographique générale menée d'une analyse comparative afin de fixer les perspectives de nos travaux de recherche. L'analyse des résultats de la littérature révèle particulièrement que la majorité des travaux ignorent des aspects très importants dans le fonctionnement de cette classe de systèmes de production. Il s'agit en particulier de se placer dans le contexte où la modélisation et la résolution de l'ordonnancement conjoint de la production et de la maintenance sont soumises uniquement à un seul critère de performance et à une ou deux contraintes énergétiques; ce qui en réalité n'est pas toujours le cas. Nous nous plaçons dans un contexte industriel où un compromis entre plusieurs objectifs doit être trouvé et les opérations des jobs sont interrompues tout à la fois par un ensemble de contraintes. Dans ce contexte, le chapitre suivant entamera la première résolution mono-objectif du système à machine unique et à plusieurs machines dans l'atelier flow-shop qui vise à minimiser la consommation totale d'énergie. Plusieurs types d'approches de résolution seront développés pour résoudre efficacement le système mono-objectif étudié, notamment, des approches de résolution exactes et approchées.

Chapitre 2

Modèles d'ordonnancement conjoint de la production et de la maintenance sous contraintes d'énergie

Chapitre 2
Modèles d'ordonnancement conjoint de la production et de la maintenance sous contraintes d'énergie

2.1. Introduction

La littérature classique sur l'ordonnancement suppose que les machines sont disponibles pour effectuer des tâches à tout moment au cours de la période d'ordonnancement. Cependant, les machines peuvent ne pas être disponibles pour diverses raisons dans des situations réalistes et réalistes, telles que des pannes aléatoires ou des opérations de maintenance préventive. Les auteurs [MOU, 2008] affirment que l'entretien préventif peut maintenir les machines en bon état et réduire le risque des pannes. L'ordonnancement intégré de la production et de la maintenance préventive dans les modèles d'optimisation doit être pris en compte afin d'équilibrer l'utilisation et la disponibilité des ressources [SAD, 2020c]. Il existe deux cas de recherche lorsque la partie maintenance est introduite dans les problèmes d'ordonnancement de la production. Pour le premier cas, les chercheurs ignorent les pannes inattendues et se concentrent uniquement sur la capacité de la machine. Par contre, le deuxième cas prend en compte l'impact des pannes imprévues et effectue la maintenance corrective (CM) en cas de panne [LIU, 2014a] et [GAH, 2016].

Dans le premier cas, les chercheurs supposent que la MP est effectuée périodiquement pour maintenir les machines dans un bon état et avec une grande fiabilité. Les pannes aléatoires peuvent être ignorées, ce qui entraîne des problèmes déterministes. Ainsi, les objectifs réguliers traditionnels, par exemple le makespan, le temps d'écoulement total, le retard, etc., seront pris en compte. Comme la machine n'est pas disponible pour traiter les tâches lorsque la MP est effectuée, l'impact de l'indisponibilité de la machine sur la production doit être analysé pour rechercher la séquence des tâches optimales. C'est-à-dire, les périodes d'indisponibilités des machines sont connues et fixées (déterministes) lorsque le début d'un intervalle et sa durée sont connus à l'avance.

Dans le deuxième cas, les chercheurs supposent qu'il y a des ruptures aléatoires inattendues pendant l'exécution du plan d'ordonnancement. Considérant l'impact de l'incertitude, ce genre de problème appartient au problème de programmation stochastique, qui est complètement différent du premier cas.

Certains chercheurs partent du principe que la machine doit être entretenue après une utilisation continue pendant un certain temps et que le temps de travail continu maximal autorisé est le « TBF » sur chaque machine. Bien que de nombreux articles étudient les problèmes d'ordonnancement liés aux contraintes d'indisponibilité, la recherche dans les ateliers de production multi-machines dans ce domaine est très rare. La plupart des articles traitant des problèmes d'atelier flow shop avec les contraintes d'indisponibilité porte sur les ateliers à deux machines. Il existe moins de travaux de recherche sur les ateliers flow shop à multi-machines sans permutation avec les intervalles d'indisponibilité dans la littérature actuelle. Les auteurs [GIR, 2015] ont examiné le cas de non-permutation avec les contraintes de disponibilité, où le nombre des opérations de la maintenance est donné au début de la procédure d'ordonnancement. Les auteurs [MER, 2015], [SAD, 2018a] et [SAD, 2018b] ont supposé que les opérations de maintenance devaient être effectuées après le traitement d'un nombre prédéterminé des tâches, ce qui diffère des contraintes de maintenance avec une durée périodique. Dans le cadre du changement climatique, l'industrie manufacturière a toujours été un gros consommateur d'énergie [SAD, 2020c]. Par ailleurs, le concept d'ordonnancement économe en énergie suscite beaucoup plus d'intérêt qu'auparavant. De ce fait, notre contribution est amenée à prendre en

compte les enjeux d'économie d'énergie dans les décisions d'ordonnancement de la production et de la maintenance. À cet égard, le présent chapitre traite les problèmes d'ordonnancement intégré des tâches de production, de maintenance préventive (PM) et de maintenance corrective (CM) dans une seule machine puis dans l'atelier flow shop à multi machines afin de minimiser la consommation totale d'énergie (TEC). Des modèles mathématiques correspondants sont établis pour minimiser la consommation totale d'énergie. Sur la base de la méthode exacte Branch and Bound intégrée sur le solveur CPLEX et de l'algorithme génétique (GA) résolu dans le logiciel Python, les performances du modèle de programmation mixte binaire entier proposé sont testées, validées et analysées à l'aide du logiciel MATLAB.

2.2. Formulation mathématique mono-objectif : Problème à machine unique

Dans le contexte actuel de mondialisation et de concurrences commerciales, les entreprises accordent de plus en plus d'importance à une production économique et rapide. Dans ce contexte, il est essentiel pour de nombreux industriels que la production soit optimisée grâce à une planification efficace et stabilisée sur le plan opérationnel. La documentation conventionnelle de la gestion prévisionnelle suppose que les machines sont accessibles à tout moment. Néanmoins, ces machines sont souvent inaccessibles dès la phase initiale de planification en raison de divers facteurs [SAD, 2018b], notamment les pannes et les plannings de maintenance dans les environnements industriels traditionnels. Tous ces problèmes de planification sont compliqués par cette considération de disponibilité [SAD, 2018a].

L'environnement de production en planification continue est toujours susceptible de se dégrader en fonction de l'utilisation, ce qui réduit la fiabilité des machines et affecte la stabilité des machines. L'efficacité de la maintenance prédictive dans l'industrie d'aujourd'hui s'étend à la maintenance préventive des machines et des systèmes. Afin d'assurer la maintenance d'une machine, celle-ci doit être entretenue après avoir été utilisée de façon permanente pendant un certain temps. Par conséquent, un horizon étendu de programmation doit comprendre un certain nombre de périodes de maintenance [ZHI, 2015]. Dans la mesure où les tâches de production et de maintenance nécessitent un temps de disponibilité des machines, les tâches de maintenance doivent être programmées précisément au même moment afin d'améliorer la productivité et les performances globales du système. Certains temps d'arrêt inattendus (pannes, reprise de travail, dates limites d'arrivée ou de changement, etc.) peuvent rapidement perturber le planning. De nombreux processus de production dans de nombreuses usines de fabrication ont un ordonnancement de production initial établi pour guider les opérations de l'atelier pendant une période d'arrêt spécifique [WEI, 1999]. Quand une interruption imprévue survient, tout ou partie du planning initial est ajusté en conséquence pour maintenir la faisabilité et la rentabilité du planning proposé initialement. À la fin de la période de planification, un ordonnancement mis en œuvre de façon efficace dans le cadre du programme de l'atelier est appelé ordonnancement réalisé [GOR, 2008].

Dans le présent travail, nous considérons les ruptures de machines. Il s'agit d'un problème de robustesse et de stabilité [SAD, 2020c] :

- Pour que la machine soit robuste, il est nécessaire qu'elle soit stable lorsque quelque chose d'imprévu se produit.
- C'est un système stable dont l'ordonnancement réalisé ne s'écarte pas de manière substantielle de l'ordonnancement initial en raison des interruptions et des révisions.

Cette section est consacrée à la résolution d'un problème d'ordonnancement des tâches de production, de maintenance préventive (PM) et corrective (CM) dans un atelier à une seule machine. Afin de minimiser la consommation totale d'énergie (TEC).

Nous proposons un modèle commun pour intégrer l'ordonnancement de la production et la maintenance préventive et corrective afin d'optimiser la consommation totale d'énergie. Nous avons adapté notre

modèle pour prendre en compte les diverses contraintes liées aux temps d'arrêt des machines et aux mesures de performance mentionnées ci-dessus. Les indices, paramètres et variables utilisés dans cette formulation sont donnés dans le tableau 2.1.

Tableau 2.1 : Notations utilisées pour formuler le problème à machine unique

Indices :	
i , j	Indices des jobs.
Ensembles :	
J	Ensemble des jobs; $J = \{J_1, J_2, \dots, J_n\}$.
Paramètres :	
n	Nombre des jobs.
T_j	Temps de traitement de la tâche j.
P_j	Puissance de traitement de la tâche j.
P_0	Puissance collective consommée par les installations auxiliaires.
C_{max}	Makepan, qui correspond à la durée d'exécution de toutes les tâches.
PM	Temps nécessaire pour effectuer une PM sur la machine.
CM	Temps nécessaire pour effectuer une CM sur la machine.
Variables de décision :	
$x_{i,j}$	$\begin{cases} 1 & \text{Si la jème tâche exécutée est la tâche i} \\ 0 & \text{Sinon} \end{cases}$
Y_i	$\begin{cases} 1 & \text{Si la PMest effectuée avant la ième tâche} \\ 0 & \text{Sinon} \end{cases}$
j_i	Le $i^{ème}$ job dans la séquence.
T_i	Le temps de traitement du ième job.
N_i	Nombre de pannes entre l'heure de début de j_i et l'heure de fin de j_i,
C_i	Le délai d'achèvement du $i^{ème}$ travail initialement prévu.
C_i^r	Le temps d'achèvement réalisé du $i^{ème}$ travail.

Cette section analyse le problème d'ordonnancement des tâches de la production et de la maintenance préventive (PM) et corrective (CM) à n jobs $\{j_1, j_2, \dots, j_n\}$ exécutés sur une seule machine. Les tâches sont disponibles à temps zéro et ne permettent aucune préemption. Supposons que lorsque la machine traitant les tâches est affectée par une défaillance, afin de prévoir des périodes de maintenance préventive et corrective dans le modèle.

Comme la fréquence des pannes peut être prédite pour une solution donnée, les méthodes B&B et GA ont été adoptées dans ce travail pour gérer ce facteur d'incertitude et minimiser la consommation totale d'énergie.

2.2.1. Exemples illustratifs

Tout d'abord, un plan initial est établi au début de l'horizon d'ordonnancement. Une solution complète peut être subdivisée en trois parties (X,Y,T), à savoirs :

- Tout d'abord, la liste des séquences des jobs X ;
- La deuxième est la matrice des positions PM, Y ;
- La troisième est l'horizon temporel de la $i^{ème}$ matrice des jobs T.

Premier exemple : Dans ce cas, il est prévu de programmer dans une seule machine la réalisation de quatre tâches. Pour ce problème, nous pouvons visualiser le diagramme de Gantt de l'ordonnancement

initial où la liste de succession des tâches est définie par $\mathbf{X} = \{1, 2, 3, 4\}$ et la matrice des positions PM correspond à $\mathbf{Y} = \{0, 0, 0, 1\}$, sur la base d'un diagramme de Gantt et où la durée de la ième matrice des tâches p est définie par **T** = {T_1, T_2 , T_3 , T_4 }. Avec :

- $x_{i,j}$: désigne le jème job effectué est le job i ;
- Y_i : signifie qu'un PM est effectué juste avant le ième job effectué dans la machine. En revanche, un PM est effectué avant le temps d'inactivité ;
- T_i : désigne le temps de traitement du ième job.

Nous suggérons d'insérer dans l'ordonnancement initial afin d'absorber l'incertitude inattendue du déplacement vers la ligne, un ordonnancement dynamique des temps d'arrêt. Un exemple de temps mort dans l'ordonnancement initial est présenté dans la figure 2.1**.** Certains temps d'arrêt n'apparaissent pas dans l'ordonnancement initial si le temps d'arrêt non planifié est complètement évité.

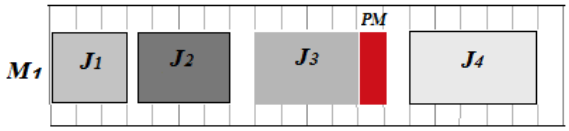

Figure 2.1 : Diagramme de Gant du plan initial du 1ér exemple

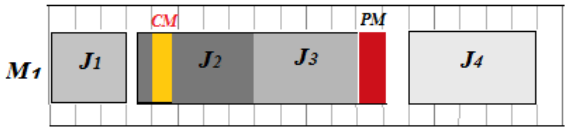

Figure 2.2 : Diagramme de Gantt intégrant une période de CM réalisée du 1ér exemple

En d'autres termes, le démarrage prévu des activités n'est pas entièrement déterminé par la programmation et est fortement influencé par les temps d'arrêt introduits. Après l'élaboration de la conception initiale au début des travaux, les séquences des jobs et les positions PM ne seront pas modifiées pendant toute la période de l'horizon de production. Les heures de début des activités réalisées seront néanmoins modifiées. Par exemple, si une interruption a lieu pendant J_3 comme indiqué dans la figure 2.1, une CM est exécutée. Les opérations J_2 peuvent être retardées. Et les opérations J_3 et PM ne seront pas retardées en raison de l'apparition d'un temps d'arrêt. Cette approche de rééchelonnement est tout à fait réalisable dans la pratique puisque l'ordonnancement initial est utilisé comme base de planification pour l'ordonnancement d'activités externes telles que le changement d'outils et l'acquisition de matériel. Si la séquence des travaux terminés est différente de la séquence initialement prévue, par exemple, de nombreux problèmes se poseront dans le système d'approvisionnement en matériel, car l'équipement préparé à l'origine doit être retiré de la production et l'équipement nouvellement acquis doit être inséré. En outre, si l'équipement correspondant n'est pas prêt, un travail ne peut pas être commencé.

Deuxième exemple : Cet exemple est identique à celui du premier exemple, mais avec une période CM correspondant à J_3, comme décrit dans la figure 2.4.

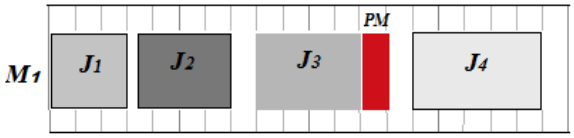

Figure 2.3 : Diagramme de Gant du plan initial du 2éme exemple

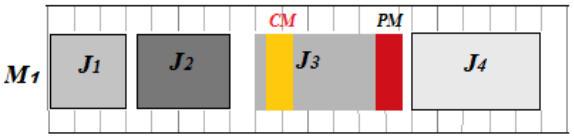

Figure 2.4 : Diagramme de Gantt intégrant une période de CM réalisée du 2éme exemple

Nous proposons de prévoir des périodes d'inactivité afin d'absorber l'instabilité fluctuante et imprévisible de la droite. Comme le montre la figure 2.3, il existe des périodes d'inactivité qui ne sont pas incluses dans les programmes si des défaillances imprévues sont négligées.
La séquence des travaux et les lieux des périodes de maintenance ne changeront pas après l'établissement du plan initial pendant toute la période de programmation. Toutefois, pour les activités, les heures de début réalisées seront modifiées. Ainsi, si une rupture se produit pendant J_3 comme indiqué dans la figure 2.4, alors une CM se produit pendant J_3 est exécutée. Les tâches J_3et PM doivent être reportées. En outre, la tâche J_4 n'est pas reportée en raison de la présence d'un temps d'inactivité ou de repos. En pratique, ce rééchelonnement est très raisonnable puisque le calendrier initial sert de base à l'ordonnancement d'activités externes connexes, telles que les changements d'outils et l'achat de fournitures. Par exemple, lorsque la séquence des tâches effectuées est différente de celle initialement prévue, cela entraîne de nombreux dysfonctionnements dans la gestion de la production, notamment en ce qui concerne l'approvisionnement en matériaux, puisque des matériaux précédemment préparés doivent être retirés de la chaîne de production et que de nouveaux matériaux doivent être introduits. De même, il est impossible de commencer un travail si la machine concernée n'est pas prête, comme le montre le premier exemple [SAD, 2020c].

2.2.2. Fonction mono-objectif : Cas du modèle à machine unique

Cette fonction vise à minimiser autant que possible les dépenses ou la consommation énergétique totale (TEC) de l'atelier à une seule machine, c'est-à-dire les dépenses énergétiques des équipements et les dépenses énergétiques générales [ZHA, 2017] et [MEN, 2018]. Dans ce contexte, la consommation totale d'énergie est constituée des dépenses énergétiques totales liées aux tâches de fabrication et de traitement ainsi que les dépenses énergétiques courantes des installations auxiliaires, qui sont estimées selon l'équation suivante, où :

$$\mathrm{TEC} = \mathrm{PEC} + \mathrm{CEC} \tag{2.1.1}$$

2.2.2.1. Consommation d'énergie des processus (PEC)

Quant à l'énergie consommée par les machines durant le traitement des tâches, cette consommation d'énergie est calculée comme suit :

$$\mathrm{PEC} = \sum_{i=1}^{n} \sum_{j=1}^{n} \mathrm{P_j} \,.\, \mathrm{T_j} \,.\, \mathrm{x_{i,j}} \tag{2.1.2}$$

2.2.2.2. Consommation d'énergie commune (CEC)

Dans le but de maintenir le climat environnant au sein de l'atelier et de préserver la température et le taux d'humidité, des installations auxiliaires telles que l'éclairage, le système de climatisation, la ventilation et le chauffage doivent être utilisées et doivent être mises en place. La prise en charge énergétique liée à ces installations auxiliaires répond à la consommation énergétique usuelle, qui se calcule à l'aide de l'équation suivante :

$$\mathrm{CEC} = \mathrm{P_0} \,.\, \mathrm{C_{max}} \tag{2.1.3}$$

2.2.2.3. Consommation totale d'énergie (TEC)

La consommation totale d'énergie (TEC) est la somme de la consommation totale d'énergie de traitement des tâches et de la consommation d'énergie commune calculée comme suit:

$$\mathrm{TEC} = \sum_{i=1}^{n} \sum_{j=1}^{n} \mathrm{P_j} \,.\, \mathrm{T_j} \,.\, \mathrm{x_{i,j}} \;+\; \mathrm{P_0} \,.\, \mathrm{C_{max}} \tag{2.1.4}$$

Dans ce contexte, la fonction objectif est la minimisation de la consommation totale d'énergie :

Fct Obj = TEC (2.1.5)

Fct Obj = P E C + C E C (2.1.6)

Fct Obj = $\sum_{i=1}^{n}\sum_{j=1}^{n} P_j . T_j . x_{i,j} + P_0 . C_{max}$ (2.1.7)

2.2.3. Modélisation du problème à une seule machine : $Sm|nr - CI|_{TEC}$

Dans le cadre de cette approche, le modèle MILP (Mixed Integer Linear Programming Model) est établi comme suit :

Minimiser Fct Obj = $\sum_{i=1}^{n}\sum_{j=1}^{n} P_j . T_j . x_{i,j} + P_0 . C_{max}$

Sous les contraintes suivantes :

$C_1 \geq PM . Y_1 + T_1$ (2.1.8)

$C_i \geq C_{i-1} + CM . Y_i + T_i \quad ; i = 2,3,\dots,n$ (2.1.9)

$T_j = \sum_{i=1}^{n} x_{i,j} . T_i \quad ; j = 1,2,\dots,n$ (2.1.10)

$C_1^r = PM . Y_1 + T_1 + CM . N_1$ (2.1.11)

$C_i^r = C_{i-1}^r + PM . Y_i + T_i + CM . N_i \quad ; i = 2,3,\dots,n$ (2.1.12)

$Robustness = E.(\sum_{i=1}^{n} C_i^r)$ (2.1.13)

$Stability = E . (\sum_{i=1}^{n} | C_i - C_i^r |)$ (2.1.14)

$C_{max} = C_n^r \; ; i = 1,2,\dots,n$ (2.1.15)

$\sum_{j=1}^{n} x_{i,j} = 1 \; ; i = 1,2,\dots,n$ (2.1.16)

$\sum_{i=1}^{n} x_{i,j} = 1 \; ; j = 1,2,\dots,n$ (2.1.17)

$x_{i,j}$ binary $\quad ; i = 1,2,\dots,n, \; j = 1,2,\dots,n$ (2.1.18)

La fonction objectif (2.1.8) se concentre sur la minimisation de toute l'énergie consommée (TEC). Les contraintes (2.1.9) et (2.1.10) établissent la relation de la ième tâche à la tâche (i + 1)i^{ème}. La contrainte (2.1.11) indique le temps de traitement de la tâche (i + 1). Les contraintes (2.1.12) et (2.1.13) indiquent le temps de traitement réel de la ième tâche. Les equations (2.1.14) et (2.1.15) définissent les contraintes pour la résilience du système (R) et la stabilité (S), séparément. En termes de robustesse, la véritable préoccupation est la performance du comportement d'ordonnancement atteint par opposition à la performance initiale de l'organisation d'ordonnancement. Par conséquent, l'efficacité de planification prévue du système $E . (\sum_{i=1}^{n} C_i^r)$ est utilisée pour évaluer la fiabilité d'un système existant. Pour assurer la stabilité, la planification réelle doit s'écarter de la planification initiale minimale. De ce fait, la somme des différences absolues dans les délais d'achèvement des tâches est utilisée comme une mesure stable $E . (\sum_{i=1}^{n} | C_i - C_i^r |)$. La contrainte (2.1.16) décrit le taux d'exécution des travaux. Les contraintes (2.1.17)

et (2.18) garantissent une seule position pour la séquence et une seule tâche peut être positionnée à une seule position dans la succession, et une seule tâche peut être positionnée à chaque position, respectivement.

2.2.4. Résolution exacte à travers l'algorithme branch-and-bound (B&B)

Parmi toutes les approches populaires pour résoudre les problèmes de programmation avec des entiers, on trouve les algorithmes de branch-and-bound. Cet algorithme suit essentiellement deux phases. La première phase consiste à séparer une série de problèmes en sous-ensembles et la seconde phase permet d'évaluer les solutions d'un sous-ensemble en valorisant la meilleure solution de ce dernier. Le processus de recherche s'arrête lorsqu'il ne reste plus de parties à explorer dans la zone de recherche de solutions, et la meilleure solution est alors reconnue comme la meilleure solution actuelle [BAK, 2010]. Cette procédure est considérée comme une dérivation descendante, comme le montre la figure 2.5.

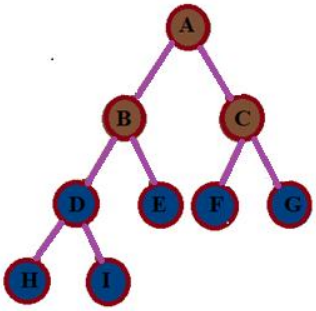

Figure 2.5 : Procédure de l'algorithme de séparation et évaluation

Cette partie est consacrée à l'analyse exacte de la performance du modèle linéaire correspondant au système étudié. Cependant, le modèle mathématique présenté dans la section précédente représente une programmation linéaire pour laquelle une résolution exacte à travers un logiciel commercial de programmation linéaire est nécessaire pour qualifier la complexité et l'état d'optimalité du problème considéré. En effet, plusieurs logiciels ont vu le jour pour résoudre les problèmes d'optimisation linéaires dont le plus performant disponible est le solveur CPLEX.

L'objectif principal de cette plateforme réside dans l'aide à la décision des industriels grâce à des fonctions d'analyse par hypothèse, de gestion de scénarios et de collaboration. La figure 2.6 illustre les différents composants de la suite d'optimisation ILOG. Ce solveur de programmation linéaire repose sur deux stratégies d'utilisation, la première consiste à invoquer un interpréteur de commande dédié d'une manière interactive **(**CPLEX interactif), tandis que la seconde consiste à amener directement les fonctionnalités du moteur depuis son propre code, que ce soit du C, du C++ ou du Java.

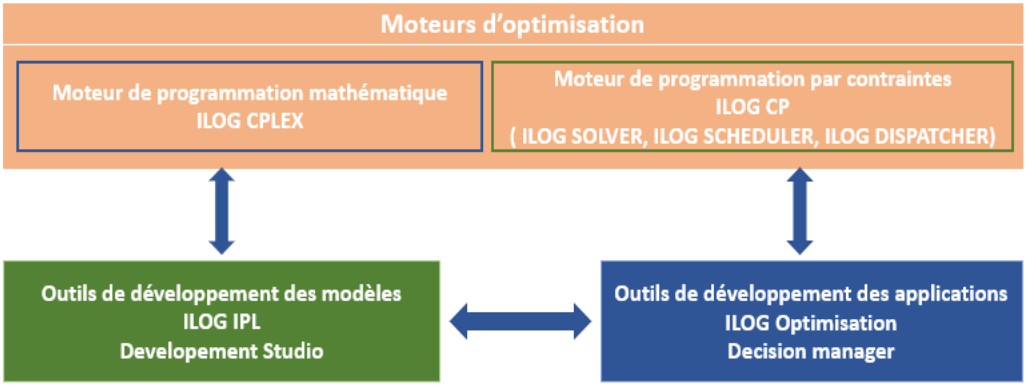

Figure 2.6 : Les composantes d'optimisation ILOG

Le solveur CPLEX résout principalement les programmes linéaires et linéaires mixtes, les programmes quadratiques et quadratiques mixtes, les programmes avec contraintes quadratiques et avec contraintes quadratiques mixtes. Ces programmes sont éventuellement traités en se basant sur un large éventail d'implémentations, notamment, le simplexe primal, le simplexe dual, le simplexe de réseau, et finalement le simplexe combiné avec le Branch and Bound et la génération de coupes.

2.2.4.1. Implémentation informatique : Sm|nr − CI|TEC

Cette section est consacrée à l'analyse exacte des performances du modèle linéaire correspondant au système étudié à une seule machine. Cependant, le modèle mathématique représente une programmation linéaire pour laquelle une méthode exacte telle que Branch and bound intégrée dans le solveur commercial CPLEX de programmation linéaire. Il est nécessaire de qualifier l'état de complexité et d'optimalité du problème considéré. En effet, 30 instances différentes pour chaque dimension fixe de **n** tâches dans une seule machine ont été générées. Selon [CLA, 1999], la génération de temps de fonctionnement entre 1 et 100 est basée sur deux raisons :

- La première raison est liée à l'uniformité historique, c'est-à-dire que la majorité des travaux de recherche relatifs aux tests de calcul du modèle linéaire, y compris les problèmes d'ordonnancement, génèrent les temps de fonctionnement à partir d'une distribution uniforme dans l'intervalle [1, 100] ;
- La deuxième raison est liée au fait qu'il est préférable d'utiliser des données représentatives des problèmes réels d'ordonnancement, dans la mesure où la génération de petits intervalles permettra certainement d'aboutir très facilement à des solutions optimales. Ces solutions ne seront pas nécessairement réalistes en raison des conclusions inadéquates susceptibles d'en résulter.

Le tableau 2.2 présente les temps de calcul moyens obtenus à l'aide du logiciel CPLEX 12.6 pour trouver la consommation énergétique totale optimale des problèmes d'ordonnancement intégré des tâches de production et de maintenance. Dans tous les cas, la puissance commune P_0 est fixée à 8. Les puissances de traitement P sont dérivées de la distribution uniforme [2, 8]. Le temps de maintenance préventive de la machine PM et le temps de maintenance corrective de la machine CM sont générés aléatoirement à partir des ensembles {5, 9, 12} et {9, 12, 15} respectivement.

Toutes les formules MILP sont modélisées à l'aide de IBM ILOG CPLEX12.6 et du langage OPL. Les 30 cas sont résolus sur un ordinateur portable HP 4300U équipé d'un processeur Intel Core i5 Duo cadencé à 2,50 GHz et de 8 Go de RAM. Le temps limite est de 300 secondes. En d'autres termes, les analyses sont terminées au bout de 300 secondes. Si aucune solution optimale n'est obtenue dans les 300 secondes, la meilleure solution actuelle est renvoyée.

Tableau 2.2 : Synthèse des résultats exacts obtenus du logiciel CPLEX 12.6

	Jobs	PM	CM	T	P_0	P	C_{max}	TEC	Time (sc)
5	Inst. 1	5	9	[10,50[	8	[2,4[	110	1140	0,14
	Inst. 2	9	12	[50,70[	8	[4,6[	270	3350	0,17
	Inst. 3	12	15	[70,100]	8	[6,8]	410	5960	0,18
7	Inst. 1	5	9	[10,50[	8	[2,4[	150	1520	0,14
	Inst. 2	9	12	[50,70[	8	[4,6[	380	4720	0,16
	Inst. 3	12	15	[70,100]	8	[6,8]	600	8620	0,19
10	Inst. 1	5	9	[10,50[	8	[2,4[	230	2340	0,17
	Inst. 2	9	12	[50,70[	8	[4,6[	550	6810	0,2
	Inst. 3	12	15	[70,100]	8	[6,8]	840	11980	0,21
15	Inst. 1	5	9	[10,50[	8	[2,4[	350	3540	0,17
	Inst. 2	9	12	[50,70[	8	[4,6[	830	10270	0,17
	Inst. 3	12	15	[70,100]	8	[6,8]	1270	18000	0,21
20	Inst. 1	5	9	[10,50[	8	[2,4[	470	4740	0,18
	Inst. 2	9	12	[50,70[	8	[4,6[	1110	13730	0,19
	Inst. 3	12	15	[70,100]	8	[6,8]	1700	24020	0,23
40	Inst. 1	5	9	[10,50[	8	[2,4[	940	9480	0,40
	Inst. 2	9	12	[50,70[	8	[4,6[	2220	27460	0,45
	Inst. 3	12	15	[70,100]	8	[6,8]	3400	48040	0,49
80	Inst. 1	5	9	[10,50[	8	[2,4[	1880	18960	10,5
	Inst. 2	9	12	[50,70[	8	[4,6[	4440	54920	11,52
	Inst. 3	12	15	[70,100]	8	[6,8]	6800	96080	12,61
100	Inst. 1	5	9	[10,50[	8	[2,4[	2350	23700	27,96
	Inst. 2	9	12	[50,70[	8	[4,6[	5550	68650	39,76
	Inst. 3	12	15	[70,100]	8	[6,8]	8500	120100	49,87
200	Inst. 1	5	9	[10,50[	8	[2,4[	4700	47400	146,87
	Inst. 2	9	12	[50,70[	8	[4,6[	11100	137299	149,05
	Inst. 3	12	15	[70,100]	8	[6,8]	17000	240199	158,1
400	Inst. 1	5	9	[10,50[	8	[2,4[			245,87
	Inst. 2	9	12	[50,70[	8	[4,6[	-----		249,04
	Inst. 3	12	15	[70,100]	8	[6,8]			258,05

Bien que dans la littérature, nous ne disposions d'aucune référence permettant de comparer nos résultats entre eux. De ce fait, le problème a été étudié en utilisant une deuxième méthode d'optimisation approximative pour les algorithmes génétiques afin de concrétiser les résultats et de générer la meilleure solution à notre problème afin de minimiser la consommation totale d'énergie.

Les métaheuristiques sont parmi les méthodes approchées qui ont suscité depuis longtemps beaucoup d'attention et occupent jusqu'à présent une place considérable dans la littérature. Ces approches de haut niveau dites d'amélioration ont été conçues pour résoudre les problèmes de complexité grandissante dans lesquels ces outils d'optimisation ont largement prouvé leur efficacité. Elles ont certainement toujours été comptées parmi les approches les plus populaires pour traiter les problèmes d'optimisation combinatoires. Néanmoins, elles comportent un large éventail d'obstacles qui handicape considérablement leurs succès. Nous expliquerons dans la section suivante la méthode approchée « l'algorithmes génétique » adoptée en vue de minimiser la consommation totale d'énergie.

2.2.5. Résolution approchée à travers des algorithmes génetiques (GA)

Les algorithmes génétiques (AG) représentent des méthodes de recherche stochastique qui permettent de surmonter une grande variété de problèmes dans le domaine des algorithmes combinatoires. Ils sont basés sur le mécanisme biologique génétique de la reproduction et de la sélection. Les AG sont conçus pour assurer la durabilité des meilleurs instincts et des plus prospectifs, permettant de rechercher avec succès une nouvelle génération de gènes plus performants à un coût supérieur. Elles sont très efficaces dans leur simplicité, leur performance connue dans le processus de découverte et leur efficacité même pour des problèmes d'une complexité toujours croissante. Suivant le concept de base des AG, une population de solutions est simulée pour simuler le processus de développement. En partant du principe de base des AG, le processus de changement commence par un génotype constitué d'un ou plusieurs chromosomes individuels, où chaque individu est équipé d'un génotype chromosomique. Les chromosomes sont constitués d'un ensemble d'éléments, appelés gènes, qui peuvent assumer plusieurs propriétés, appelées "allégations". Dans ces algorithmes dits évolutifs, il est nécessaire d'utiliser les trois opérateurs fondamentaux suivants : la sélection, qui élimine les solutions qui ont peu de chances d'être les plus prometteuses. En outre, pour mettre en œuvre un algorithme génétique, il est nécessaire de disposer de quatre données qui correspondent pratiquement à la taille de la population, à la probabilité de croisement, à la probabilité de mutation et au nombre total de générations.

2.2.5.1. Procédure des algorithmes génétiques

L'algorithme génétique commence par une étape appelée génération, au cours de laquelle une première Pop-size une population d'individus est créée. Pour chaque individu généré, une fonction d'aptitude individuelle est calculée afin de définir le niveau d'adaptation du processus de sélection. Les individus progressent dans l'application de croisement avec une probabilité Pc. Ensuite, les enfants qui en résultent sont inversés au niveau du gène avec une probabilité Pm de mutation. Ces trois stades d'évolution permettent avec une grande possibilité de générer une nouvelle population qui est meilleure que la précédente, comme le montrent la figure 2.7.

À chaque nouvelle génération, les populations augmentent et un cycle se répète tant que l'évaluation estime qu'une solution n'est pas déjà optimale. Le processus général de l'investigation génétique est illustré à la figure 2.7.

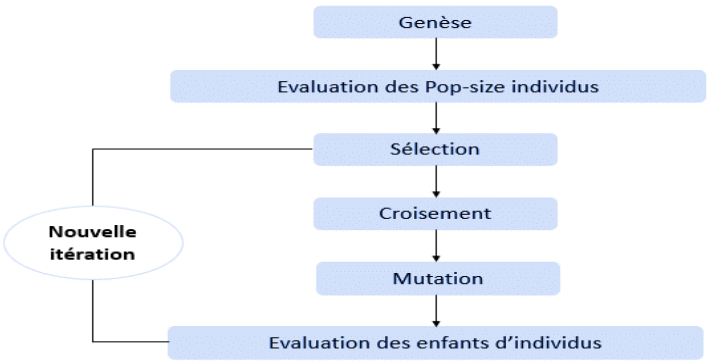

Figure 2.7 : Mécanisme général de l'algorithme génétique

Un algorithme génétique se compose de cinq phases (Algorithme 2.1) :

Algorithme 2.1 : Pseudo code de l'algorithme génétique GA

Étape 1. Initialiser Popsize, Pc, Pm et max_iteration ;
Étape 2. Générer une population initiale P (n) qui représente un séquencement des jobs sur les ressources ;
Étape 3. Calculer la valeur du fitness à chaque séquence des jobs sur les ressources ;
Étape 4. Sélectionner le meilleur fitness de la population à l'aide de la méthode de sélection du tournoi
Étape 5. Tant que le nombre d'itérations n'est pas atteint :
Pour chaque séquence de 1 à Popsize :

Choisir aléatoirement 2 séquences de P(n).

Si aléatoire <= Pc :

Appliquer le croissement en 2 points et produire 2 enfants.

Appliquer le shift change mutation ;

Copier les enfants dans la nouvelle population ;

Évaluer la nouvelle population.

Étape 6. Si le critère d'arrêt est atteint, terminer et retourner la valeur optimale trouvée sinon retourner à l'étape D.

2.2.5.2. Calibrage des paramètres des AGs : Plan d'expériences de Taguchi

La force et l'efficacité des approches d'optimisation dépendent en grande partie de la sélection adéquate des paramètres. Dans cette perspective, une méthodologie de choix nommée 'les plans d'expériences' a été utilisée en vue d'optimiser les paramètres du processus génétique. Généralement, cette technique vise à identifier et à instaurer les liens existants entre des variables d'entrée du processus et une grandeur d'intérêt, appelée réponse. Dans un plan de Taguchi, le rapport signal bruit (S/B) représente un indicateur de variation utilisé pour mesurer la variation existante dans la réponse en question afin d'identifier les facteurs de contrôle qui réduisent la variabilité. Il existe trois catégories de caractéristiques de performance pour étudier le rapport signal/bruit : Préférer plus petit- Préférer plus nominal- Préférer plus grand. Comme la présente étude porte sur un problème de minimisation, le rapport signal/bruit doit être mesuré à l'aide de la valeur la plus faible, comme indiqué ci-dessous : $\frac{S}{N} = -10\log_{10}(\frac{1}{n}\sum_{i=1}^{n}\frac{1}{yi^2})$.

Où, n et y représentent le nombre d'observations et la variable réponse, respectivement. Relativement à l'approche d'optimisation que l'on souhaite paramétrer, quatre facteurs, dont la taille de la population, le nombre maximum d'itérations, la probabilité de croisement et la probabilité de mutation sont définis comme étant des facteurs de contrôle critiques. Cette phase de recherche a été élaborée sur Minitab représentant la référence mondiale et incontournable pour les praticiens visant à optimiser et contrôler leurs processus. Dans cet ordre d'idées, 27 séries d'expériences ont été réalisées en s'appuyant sur la distribution de la table orthogonale, et trois niveaux ont été attribués à chaque facteur, comme l'illustre le tableau 2.3.

Tableau 2.3 : Différents niveaux de chaque paramètre des algorithmes génétiques

Facteurs	Pop_Size	Max-iter	PC	Pm
Niveau 1	100	200	40 %	10 %
Niveau 2	200	400	60 %	40 %
Niveau 3	400	600	90 %	70 %

La figure 2.8 représente un graphique des effets principaux crée sur Minitab en traçant la moyenne des caractéristiques pour chaque niveau de facteur. Par ailleurs, quant au calibrage de l'approche d'optimisation en question, les quatre facteurs considérés ci-dessus doivent être ajustés tels que : la taille de la population = 400, le nombre d'itérations = 400, la probabilité de mutation = 0,1 et la probabilité de croisement = 0,4. Le tableau 2.4 regroupe le niveau de chaque facteur sélectionné en vue de contrôler et optimiser la méthode d'optimisation adoptée pour la résolution du système $\mathbf{Sm|nr-CI|TEC}$.

Tableau 2.4 : Paramètres optimaux des AGs

Méthode	Pop_Size	Max-iter	PC	Pm
AG	400	400	40 %	10 %

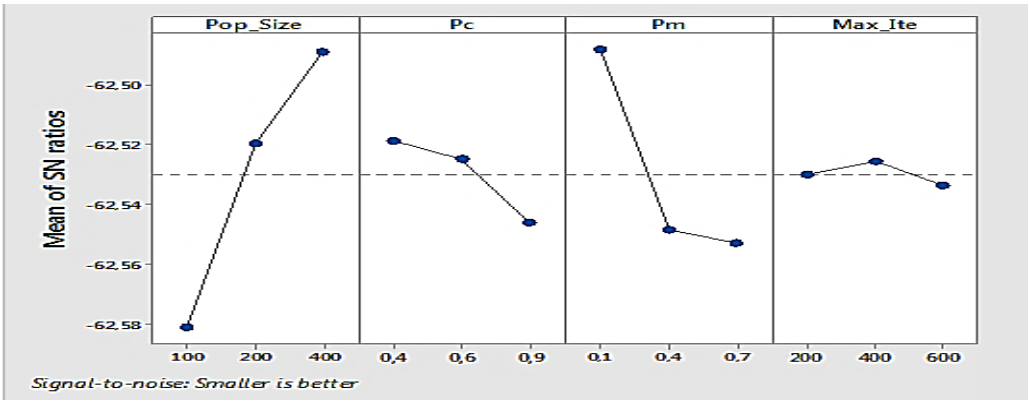

Figure 2.8 : Graphique des effets principaux du rapport (S/B)

2.2.5.3. Résultats et analyse comparative des méthodes

Le tableau 2.5 illustre les résultats obtenus par la comparaison entre les deux méthodes GA et B&B. Une illustration de l'écart moyen entre la méthode approximative des algorithmes génétiques GA et la méthode exacte de B&B dans CPLEX, calculé comme suit $\frac{(\text{TEC (GA)}-\text{TEC (B\&B)})}{\text{TEC (B\&B)}} \times 100\%$. Le TEC (B&B) est la solution optimale ou la limite inférieure trouvée par le CPLEX en 3600 secondes. L'algorithmes génétique GA a été exécuté 10 fois pour chaque cas, et le TEC(GA) est la valeur moyenne des solutions.

Tableau 2.5 : Récapitulatif des résultats de comparaison entre GA et B&B

Jobs		PM	CM	T	P_0	P	TEC (GA)	TEC (B&B)	Gap (%)
5	Inst. 1	5	9	[10,50[	8	[2,4[	1148	1140	0,7017
	Inst. 2	9	12	[50,70[	8	[4,6[	3364	3350	0,4179
	Inst. 3	12	15	[70,100]	8	[6,8]	5972	5960	0,2013
7	Inst. 1	5	9	[10,50[	8	[2,4[	1532	1520	0,7894
	Inst. 2	9	12	[50,70[	8	[4,6[	4732	4720	0,1617
	Inst. 3	12	15	[70,100]	8	[6,8]	8633	8620	0,1508
10	Inst. 1	5	9	[10,50[	8	[2,4[	2341	2340	0,0427
	Inst. 2	9	12	[50,70[	8	[4,6[	6822	6810	0,1762
	Inst. 3	12	15	[70,100]	8	[6,8]	11998	11980	0,1502
15	Inst. 1	5	9	[10,50[	8	[2,4[	3543	3540	0,0847
	Inst. 2	9	12	[50,70[	8	[4,6[	10274	10270	0,0389
	Inst. 3	12	15	[70,100]	8	[6,8]	18010	18000	0,0555
20	Inst. 1	5	9	[10,50[	8	[2,4[	4745	4740	0,1054
	Inst. 2	9	12	[50,70[	8	[4,6[	13760	13730	0,2184
	Inst. 3	12	15	[70,100]	8	[6,8]	24067	24020	0,1956
40	Inst. 1	5	9	[10,50[	8	[2,4[	9499	9480	0,2004
	Inst. 2	9	12	[50,70[	8	[4,6[	27477	27460	0,0619
	Inst. 3	12	15	[70,100]	8	[6,8]	48053	48040	0,0270
80	Inst. 1	5	9	[10,50[	8	[2,4[	18973	18960	0,0685
	Inst. 2	9	12	[50,70[	8	[4,6[	54931	54920	0,0200
	Inst. 3	12	15	[70,100]	8	[6,8]	96098	96080	0,0187
100	Inst. 1	5	9	[10,50[	8	[2,4[	23721	23700	0,0886
	Inst. 2	9	12	[50,70[	8	[4,6[	68683	68650	0,0480
	Inst. 3	12	15	[70,100]	8	[6,8]	120210	120100	0,0915
200	Inst. 1	5	9	[10,50[	8	[2,4[	47428	47400	0,0590
	Inst. 2	9	12	[50,70[	8	[4,6[	137319	137299	0,0145
	Inst. 3	12	15	[70,100]	8	[6,8]	240238	240199	0,0162

Le modèle MILP résolu avec la méthode exacte de B&B permette de trouver la meilleure solution dans un délai très court et dans un temps raisonnable pour les problèmes de petite taille. Cependant, le

modèle MILP nécessitent un temps excessif pour les problèmes de grande taille. Pour cette raison, une approche d'algorithme génétique (GA) a été utilisée pour résoudre les grands problèmes.

Conformément au tableau 2.5, les meilleurs résultats ont été obtenus dans le cas de la résolution exacte, cependant pour la méthode approximative AG, des résultats plus élevés que ceux obtenus dans le cas de la résolution exacte ont été trouvés. Sur cette constatation, une analyse numérique a été menée sur la base des résultats obtenus avec les méthodes exactes, comme décrit dans les figures suivantes de cette section du chapitre.

Par rapport aux différents problèmes traités, les temps de calcul moyens sont relativement raisonnables pour les petits problèmes. Dès que la taille du problème est plus importante. Les temps de calcul sont de plus en plus importants, comme le montre la figure 2.9.

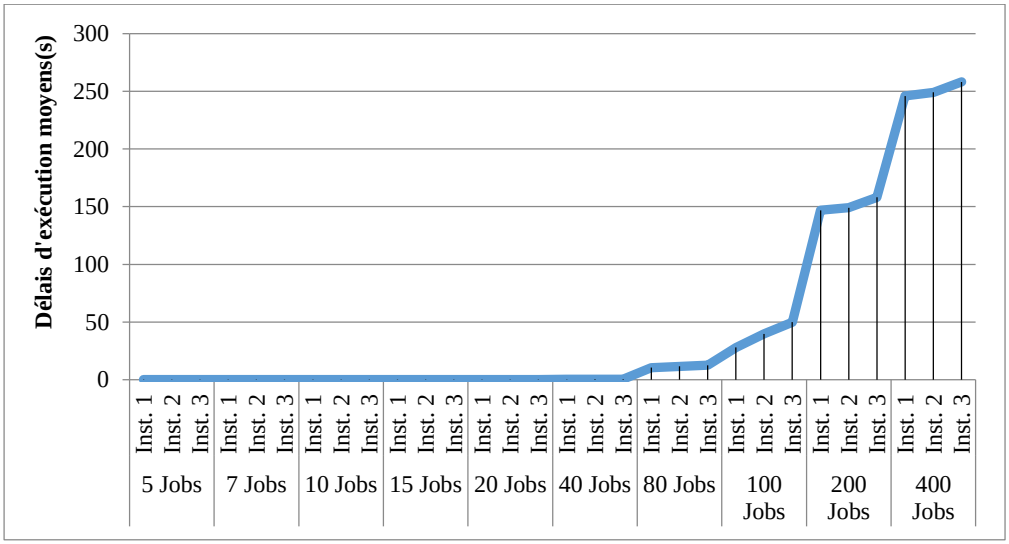

Figure 2.9 : Délais d'exécution moyens pour les différentes instances

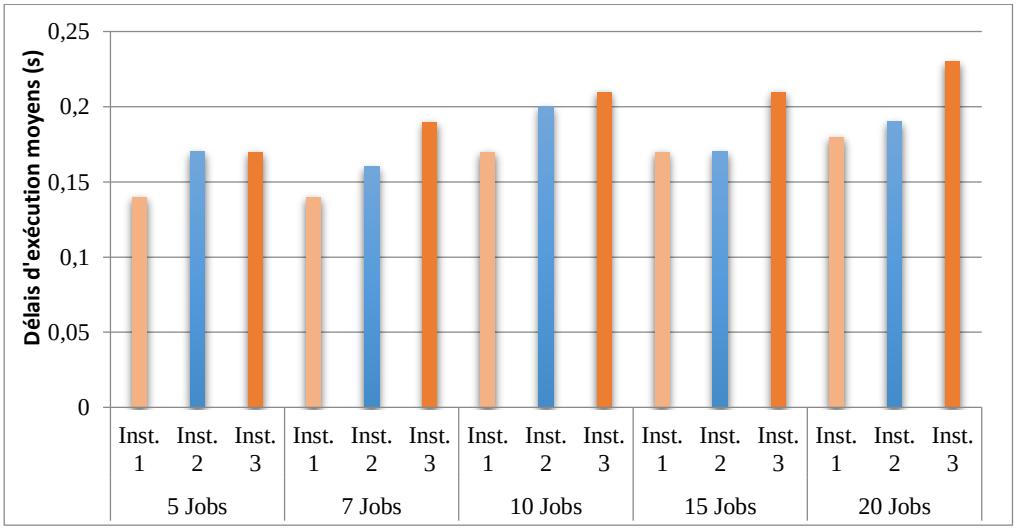

Figure 2.10 : Analyse comparative des délais moyens d'exécution pour les petits problèmes

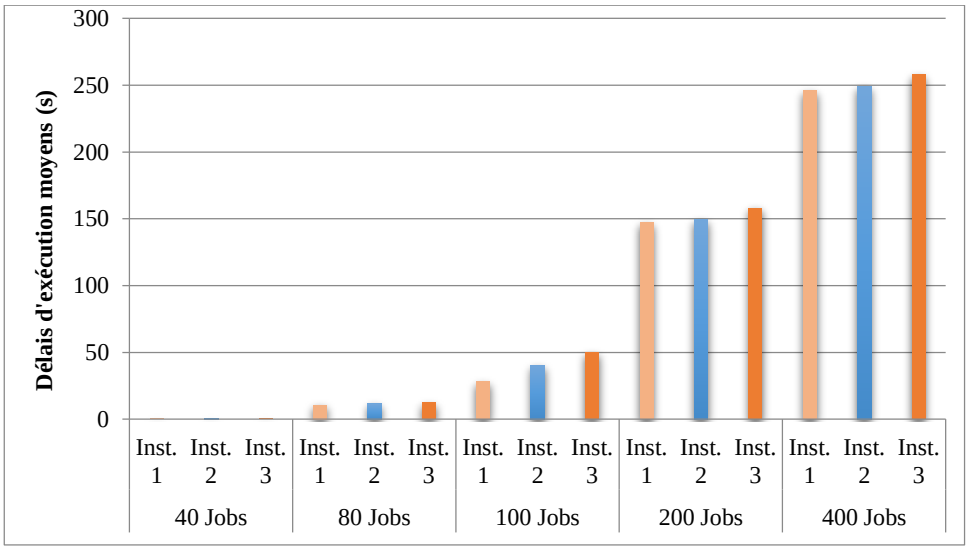

Figure 2.11 : Analyse comparative des délais moyens d'exécution pour les grands problèmes

Selon la figure 2.10, les temps de calcul moyens sont relativement raisonnables (moins de 30 secondes) lorsque le problème concerne moins de 20 tâches. Dès que la taille dépasse 20 tâches, les temps de calcul deviennent très importants. Par exemple, pour la troisième instance du problème (100 tâches), la valeur du temps de maintenance préventive PM est de 12, le temps de maintenance corrective CM est de 15, les temps de traitement des tâches ont été générés uniformément dans l'intervalle [70, 100]. Dans ce cas, les puissances de traitement P sont dérivées de la distribution uniforme [6, 8], suivies par la puissance commune qui qui correspond à 8. Pour ce cas, les résultats sont obtenus pour un temps de réalisation de 49,87 secondes. De même, pour le troisième cas du problème (400 tâches), le temps de réalisation est de 258,05 secondes.

Pour illustrer davantage l'impact de la valeur de TEC sur Cmax, une étude comparative de l'évolution de la consommation totale d'énergie et de makespan en fonction des temps d'exécution moyens est établie pour les petits et grands problèmes (figure 2.12). Par ailleurs, du fait que les valeurs de la TEC sont bien supérieures aux valeurs de la Cmax, une meilleure illustration des valeurs de la Cmax est présentée à la figure 2.13.

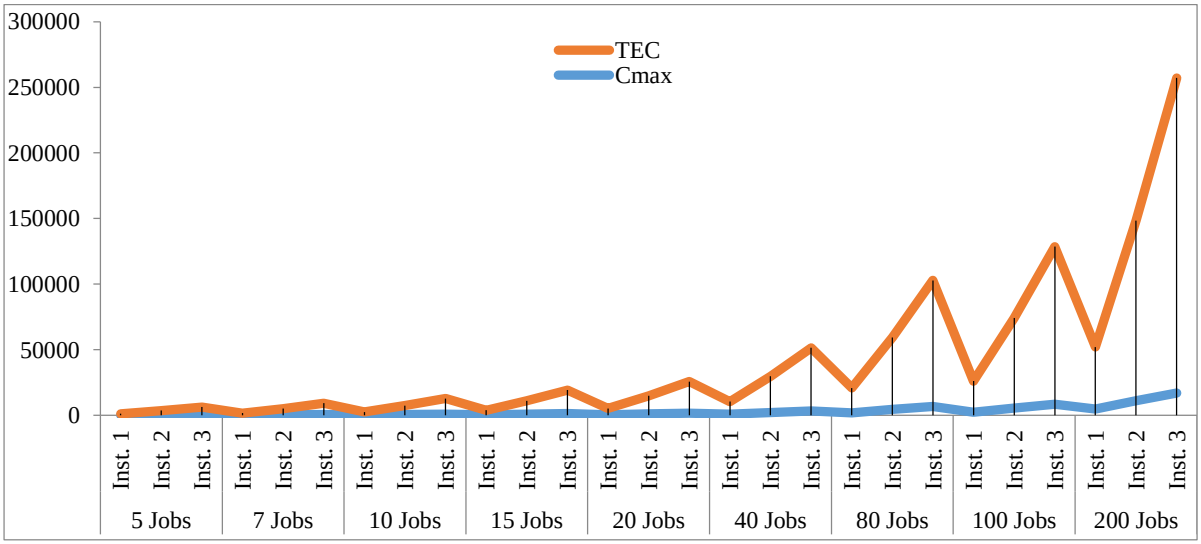

Figure 2.12 : Évolution de la consommation totale d'énergie et du Makespan selon les instances

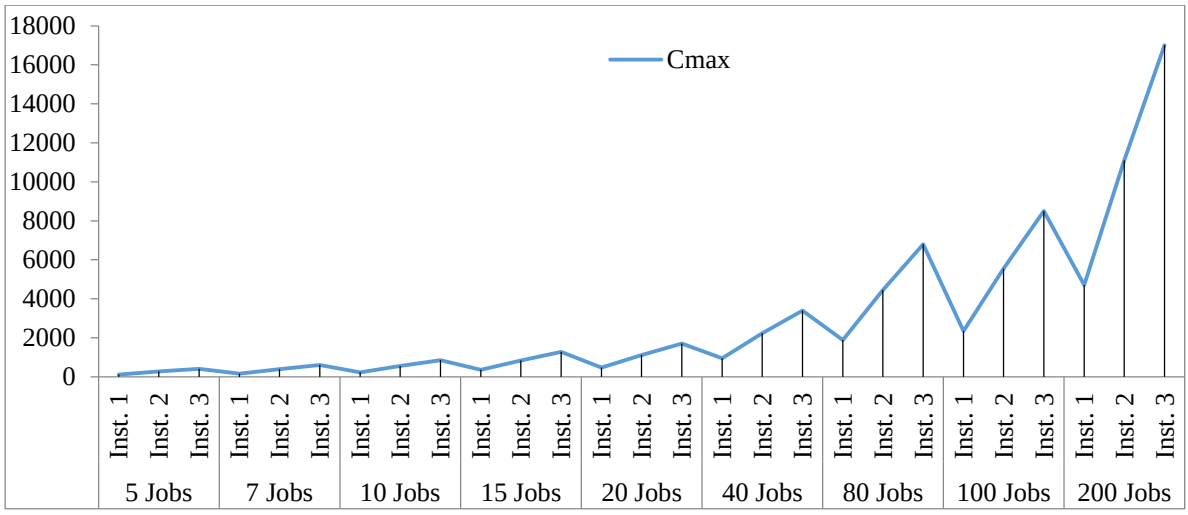

Figure 2.13 : Évolution du Makespan selon les instances

Il ressort de la figure 2.12 que la variation de la consommation d'énergie dépend du nombre des tâches à exécuter. Comme illustre la figure 2.12, lorsque la puissance de traitement des tâches augmente, une augmentation considérable de l'énergie consommée est constatée. Si la transition de la première à la deuxième instance du problème à (80 tâches), est prise en compte. En effet, pour P, déterminé à partir de la distribution uniforme [2, 4], la valeur TEC obtenue est de 18960 et la deuxième instance pour la puissance de traitement de toutes les tâches P est déterminée à partir de la distribution uniforme [4, 6], la valeur TEC est de 54920, confirmant ainsi tout ce qui précède.

Au sujet de la puissance de traitement, les valeurs fournies dans le tableau 2.2 et la figure 2.12 et la figure 2.13, montrent que le fait d'augmenter le temps d'achèvement final de toutes les tâches entraîne une augmentation significative de la consommation d'énergie. À titre d'exemple pour le deuxième cas de figure à (5 tâches) (10 tâches) (20 tâches) (80 tâches) et (200 tâches), le temps d'achèvement de toutes les tâches Cmax est égal respectivement à (270, 550, 1110, 4440 et 11100) ; ainsi que la consommation d'énergie TEC suit également cette évolution (3350, 6810, 13730, 54920 et 137299) ; respectivement, comme indiqué dans le tableau 2.2.

Dans la mesure où notre fonction objectif comprend la somme de la consommation d'énergie du processus de traitement des tâches et de la consommation d'énergie des installations auxiliaires, ces dernières comprennent également le temps d'achèvement de toutes les tâches, comme le montre L'équation 2.1.7 de la minimisation de la fonction objectif $\mathbf{Fct\ Obj} = \sum_{i=1}^{n}\sum_{j=1}^{n} P_j \cdot T_j \cdot x_{i,j} + P_0 \cdot C_{max}$. Par ailleurs, il est évident que le Makespan augmente avec l'augmentation du nombre de tâches, mais sa valeur reste presque négligeable par rapport à la consommation totale d'énergie, comme le montrent le tableau 2.2 et les figure 2.12 et 2.13.

Une illustration de la consommation énergétique réalisée par le logiciel Matlab pour des problèmes de petite taille dans les différentes configurations dans l'atelier à une seule machine est présentée à la figure 2.14 sous différentes instances suivantes : (5jobs), (7jobs), (10jobs), (15jobs) et (20jobs). Ce schéma montre un graphique en 3 dimensions ((n tâches), Instance, TEC).

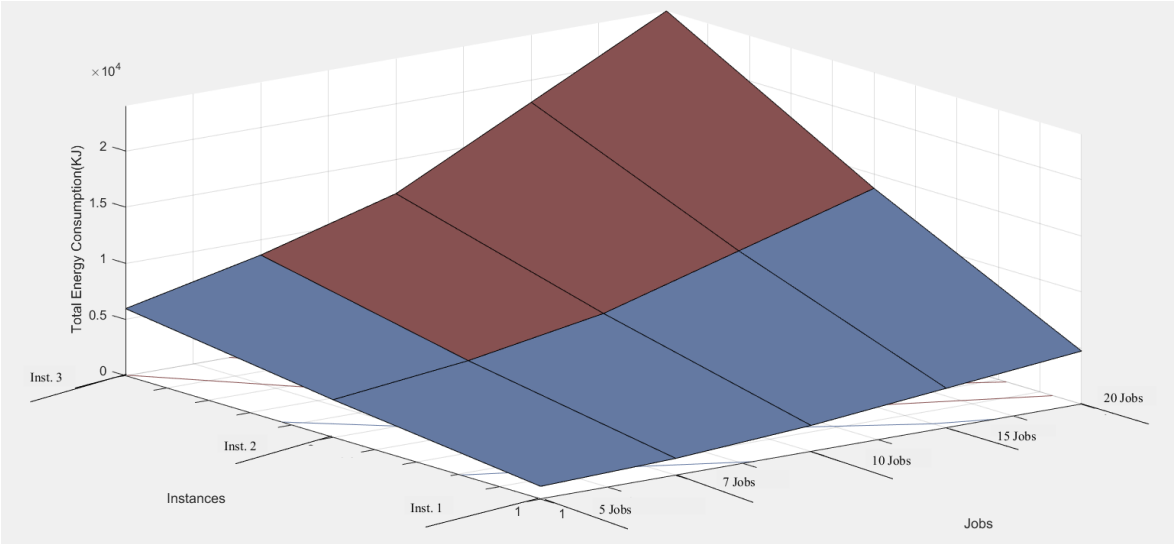

Figure 2.14 : Évolution de la consommation totale d'énergie en fonction des instances pour les petits problèmes

Les écarts de consommation d'énergie indiqués à la figure 2.14 révèlent que dans le cas d'une petite puissance de traitement des tâches, telle que celle indiquée dans le premier cas avec P, déterminée à partir de la distribution uniforme [2, 4], la consommation d'énergie est plus faible en cas de grande puissance, comme celle indiquée dans le deuxième cas avec P, déterminée à partir de la distribution uniforme [4, 6]. À titre d'exemple, dans le premier cas, la consommation d'énergie pour un atelier à 10 tâches est de 2340 et dans le deuxième cas de ce problème, la valeur du TEC s'est avérée être de 6810 ; cela confirme les résultats obtenus dans le cadre des études de petite et de grande taille mentionnées précédemment et dans le tableau 2.2.

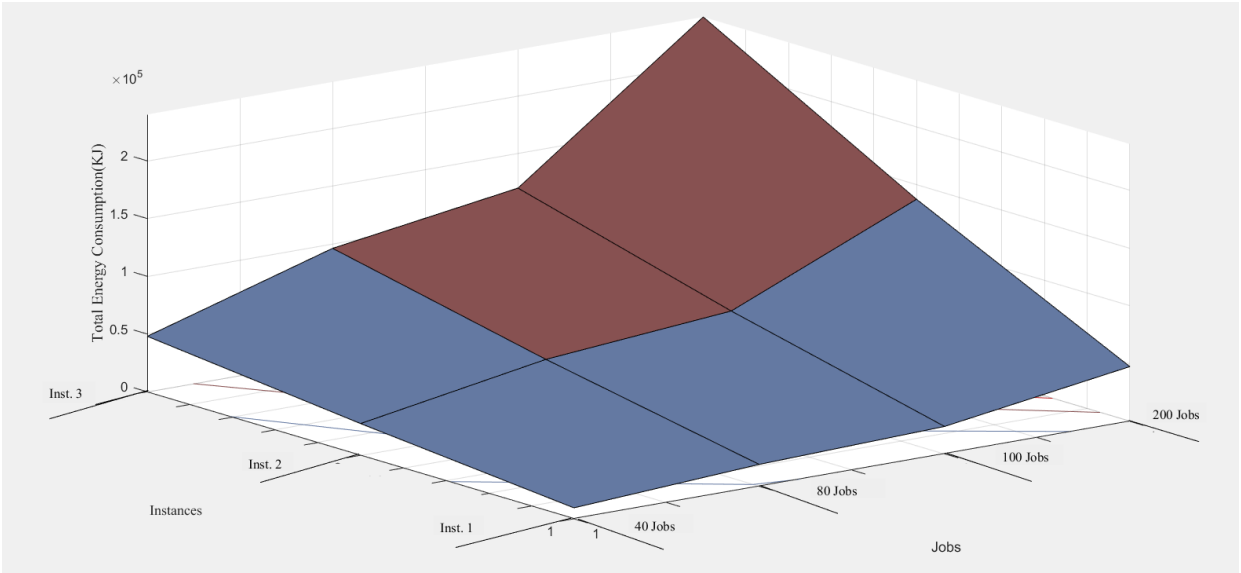

Figure 2.15 : Évolution de la consommation totale d'énergie en fonction des instances pour les grands problèmes

Dans le même ordre d'idées, pour les gros problèmes de programmation, la figure 2.15 illustre la consommation d'énergie réalisée par le logiciel Matlab pour les gros problèmes dans les différentes configurations : (40 tâches), (80 tâches), (100 tâches) et (200 tâches).On constate que les variations de la consommation d'énergie illustrées dans la figure 2.15 prouvent que si nous avons une petite valeur de la

puissance de traitement des tâches telle que représentée dans le premier cas avec P est déterminée à partir de la distribution uniforme [2, 4], la valeur de la consommation d'énergie sera encore plus faible dans le cas où nous mettons une grande puissance telle que représentée dans une deuxième instance avec P est déterminée à partir de la distribution uniforme [4, 6]. Ainsi, dans le premier cas, la consommation d'énergie pour ce type d'atelier (100 tâches) est de 23700 et dans la deuxième instance du même problème, la valeur TEC s'est avérée être de 68650 ; cela confirme ce qui a déjà été observé dans les petites et grandes études mentionnées ci-dessus.

2.3. Formulation mathématique mono-objectif : Problème flowshop à plusieurs machines

Cette section traite les problèmes d'ordonnancement intégré des tâches de la production et de la maintenance de durée fixe et flexible afin de minimiser la consommation totale d'énergie (TEC) dans l'atelier flow shop de non-permutation.

Le flow-shop est un système de traitement dans lequel la séquence des tâches de chaque job $(J_1, \dots, J_n)$ est entièrement spécifiée. Dans cet atelier, un ensemble des jobs doit être traité par un ensemble de $(M_1, \dots, M_m)$ machines disposées en série. Tous les jobs passent sur toutes les machines dans le même ordre afin d'optimiser une ou plusieurs fonctions objectives. La séquence des tâches sur chaque machine reste inchangée dans un ordonnancement PFS (permutation flowshop), alors que dans une NPFS (non permutation flowshop), la séquence des tâches peut être différente sur les machines consécutives.

Dans la littérature, deux types des contraintes d'indisponibilité sont examinés. Dans le premier cas, les intervalles d'indisponibilité sont fixés périodiquement et connus à l'avance. Dans le second cas, les intervalles d'indisponibilité sont flexibles et le temps de travail continu des machines ne peut pas dépasser le temps maximum autorisé. Dans notre étude, nous examinons les deux types des contraintes d'indisponibilité. Deux modèles de programmation binaires mixtes en nombres entiers sont fournis pour dériver les ordonnancements optimaux, respectivement. En ajoutant des contraintes pour minimiser la consommation totale d'énergie dans l'atelier étudié flowshop à plusieurs machines au modèle existant [WEI, 2016] qui minimise le makespan, nous obtenons de nouveaux modèles d'ordonnancement conjoint de la production et de la maintenance sous contraintes énergétiques [SAD, 2019a]. Nous avons adapté nos modèles pour prendre en compte les différentes contraintes de consommation d'énergie totale du traitement des opérations et de consommation d'énergie commune des installations auxiliaires dans l'atelier «flow shop de non permutation» précédemment mentionné. Les indices, paramètres et variables utilisés dans cette formulation sont donnés dans le tableau 2.6.

Tableau 2.6 : Notations utilisées pour formuler le problème flow shop à plusieurs machines

Indices :	
i	Indice des tâches.
j	Indice des machines.
k, k'	Indices des positions dans chaque machine.
l	Indice du lot dans chaque machine.
Ensembles :	
J	Ensemble des tâches ; $J = \{J_1, J_2, \dots, J_n\}$.
M	Ensemble des machines ; $M = \{M_1, M_2, \dots, M_m\}$.
O_i	Ensemble des opérations de J_i; $O_i = \{O_{i,1}, O_{i,2}, \dots, O_{i,m}\}$.
$BH_{l,j}$	Ensemble des lots dans le l*ème* lot de la machine M_j.
Paramètres :	
n	Nombre des tâches.
m	Nombre des machines.
$T_{i,j}$	Temps de traitement de l'opération $O_{i,j}$.
$P_{i,j}$	Puissance de traitement de l'opération $O_{i,j}$.
TBF_j	La période entre deux périodes de la maintenance préventive consécutive dans M_j.
PM_j	La durée de la maintenance préventive sur la machine M_j.
Z	Un entier infini.
C_{max}	Le makespan, qui correspond au temps d'exécution maximal de toutes les tâches.
P_0	La puissance commune, consommée par les équipements auxiliaires.
P E C	La consommation totale d'énergie du traitement $O_{i,j}$.
C E C	La consommation d'énergie commune des installations auxiliaires dans l'atelier.
T E C	La consommation totale d'énergie dans l'atelier "flow shop".
Variables de décision :	
$x_{i,j,k}$	$\begin{cases} 1 \text{ si la tâche } J_i \text{ est traité à la kéme position dans } M_j \\ 0 \text{ Sinon} \end{cases}$
$g_{k,j}$	$\begin{cases} 1 \text{ si l'opération } O_{k,j} \text{ est la dernière opération d'un lot réel,} \\ 0 \text{ Sinon} \end{cases}$
$y_{k,j}$	$\begin{cases} 1 \text{ si PM est effectuée immédiatement avant la kème tâche dans la machine j} \\ 0 \text{ sinon} \end{cases}$
Variables auxiliaires :	
$J_{k,j}$	La $k^{ème}$ tâche dans la machine M_j.
$O_{k,j}$	L'opération de la tâche $J_{k,j}$ dans la machine M_j.
$T_{k,j}$	Le temps de traitement de l'opération $O_{k,j}$ dans la machine M_j.
$S_{k,j}$	L'heure de début de l'opération $O_{k,j}$ dans la machine M_j.
$C_{k,j}$	L'heure de fin de l'opération $O_{k,j}$ dans la machine M_j.
$e_{k,j}$	Temps écoulé de $O_{k,j}$, qui correspond au temps écoulé entre l'heure de fin de $O_{k,j}$ et l'heure de fin du dernier intervalle de non-disponibilité.
$q_{k,j}$	Nombre des lots vides compris entre $O_{k,j}$ et $O_{k-1,j}$. $q_{1,j}$ est le nombre des lots vides compris entre $O_{1,j}$ et le temps zéro.
$a_{k,j}$	L'âge de la machine après l'opération $O_{k,j}$ dans la machine M_j.
$b_{k,j}$	L'âge de la machine avant l'opération $O_{k,j}$ dans la machine M_j.

Un ensemble de tâches J doit être exécuté sur un ensemble des machines M. Chaque tâche J_i ($J_i \in J$) consiste en une séquence de m opérations $\{O_{i1}, O_{i2},\ldots, O_{im}\}$ et nécessite un temps de traitement fixe $T_{i,j}$, une durée de la période de la maintenance préventive TBF_j, un temps de maintenance PM_j et une puissance de traitement $P_{i,j}$dans la machine M_j. Toutes les tâches sont disponibles au début de l'horizon d'ordonnancement. Les séquences des tâches optimales ne sont pas nécessairement identiques lorsque la contrainte d'indisponibilité est prise en compte, même pour les ateliers flow shop à deux machines. Ainsi, l'ordonnancement de non-permutation est considéré dans cette étude est le suivant :

- Supposons qu'on a sept tâches à ordonnancer dans un système de traitement flow shop avec quatre machines, c.-à-d. n = 7 et m = 4. Les temps de traitement $T_{i,j}$, la période TBF_j et le temps de maintenance PM_j sont indiqués dans le tableau 2.5.
- On suppose que $TBF_j \geq T_{i,j}$ pour toutes les tâches, sinon il n'y a tout simplement pas de temps réalisable.
- Aucune préemption des opérations n'est autorisée (c'est-à-dire les cas non susceptibles de reprise).
- L'ordonnancement π peut-être noté comme $\pi = \{\pi_1, \pi_2, \ldots, \pi_m\}$, où π_j représente la séquence des tâches dans M_j.
- Un lot indique l'ensemble des tâches de la même période de tâche, puis π_j peut être représenté comme $\pi_j = \{BH_{1,j}, PM_{1,j}, BH_{2,j} \ldots, PM_{l-1,j}, BH_{l,j}, \ldots\}$, où $BH_{l,j}$ est le lth lot dans π_j.
- Soit $Q_{l,j}$ est le temps total de traitement des tâches dans $BH_{l,j}$.
- Soit $J(BH_{l,j})$ est la dernière tâche dans $BH_{l,j}$.
- Soit $G_{l,j}$ est le temps d'inactivité entre l'heure de fin de $J(BH_{l,j})$ et l'heure de début de la prochaine maintenance.
- S'elle n'y a pas de tâche dans $BH_{l,j}$, le lot est appelé «lot vide»; sinon, il s'agit d'un «lot réel» .

Dans un premier temps, les modèles mathématiques doivent être établis pour donner une formulation claire des problèmes correspondants. De nombreux chercheurs ont étudié les modèles mathématiques des problèmes d'ordonnancement sans les contraintes d'indisponibilité. Deux cas principaux sont présentés ici. L'auteur [WAG, 1959] a proposé des modèles de programmation mathématique entièrement entiers incorporant la méthode de modélisation du problème d'affectation pour l'ordonnancement général en atelier et les FSP avec un ordonnancement de permutation.

En revanche, l'auteur [MAN, 1960] a utilisé des paires de contraintes dichotomiques, ou leurs équivalents algébriques, pour contrôler l'affectation des tâches à diverses positions de séquence. Les auteurs [TSE, 2004] et [STA, 2005] ont montré que les modèles de l'auteur [WAG, 1959] nécessitent deux fois plus de variables binaires que les modèles de l'auteur [MAN, 1960], alors que les modèles de l'auteur [MAN, 1960] nécessitent plus de contraintes pour la même taille de problèmes. Tous les modèles de l'auteur [WAG, 1959] exigent beaucoup moins de temps de calcul que tous les modèles Manne pour résoudre l'ensemble des problèmes courants.

Ainsi, la méthode de modélisation de l'auteur [WAG, 1959] sera utilisée dans les sous-sections suivantes. En effet, les modèles Wagner sont plus faciles à intégrer avec les contraintes d'indisponibilité par rapport aux modèles de l'auteur [MAN, 1960], puisque les intervalles de non disponibilité (modèle 1) ou l'âge de la machine (modèle 2) doivent être indexés [WEI, 2016].

Tableau 2.7 : Paramètres utilisées dans l'exemple étudié de l'atelier flowshop (7∗4)

Machine	Job1	Job2	Job3	Job4	Job5	Job6	Job7	TBF	PM
1	7	12	11	13	17	9	12	32	7
2	9	13	20	10	10	8	10	29	7
3	15	9	14	10	10	14	13	37	9
4	14	8	13	9	9	13	12	34	8

2.3.1. Fonction mono-objectif : Cas du modèle flowshop à plusieures machines

La fonction objectif minimise la consommation totale d'énergie (T E C) de l'atelier flow shop, la consommation totale d'énergie comprend principalement la consommation d'énergie des machines-outils et la consommation d'énergie commune [ZHI, 2015], [GOR, 2008] et [WEI, 1999]. La consommation totale d'énergie est la somme de la consommation totale d'énergie de traitement des tâches et de la consommation d'énergie commune de toutes les installations auxiliaires calculées comme suit :

$$T\,E\,C = P\,E\,C + C\,E\,C \tag{2.3.1}$$

2.3.1.1. Consommation d'énergie de traitement (PEC)

S'agissant de l'énergie consommée par les machines lors du traitement des opérations, la consommation en énergie de traitement peut être calculée comme suit :

$$P\,E\,C = \sum_{i=1}^{n}\sum_{j=1}^{m}\sum_{k=1}^{n} P_{i,j} \cdot T_{i,j} \cdot x_{i,j,k} \tag{2.3.2}$$

2.3.1.2. Consommation d'énergie commune (CEC)

Afin de préserver l'environnement de l'atelier (température et humidité, par exemple), des installations auxiliaires telles que l'éclairage, la climatisation, la ventilation et le chauffage doivent être utilisées. La consommation d'énergie de ces installations auxiliaires correspond à la consommation d'énergie commune, qui peut être calculée à l'aide de l'équation 2.2.3.

$$C\,E\,C = P_0 \cdot C_{max} \tag{2.2.3}$$

2.3.1.3. Consommation totale d'énergie (TEC)

La consommation totale d'énergie (TEC) est la somme de la consommation totale d'énergie de traitement et de la consommation d'énergie commune calculée comme suit:

$$T\,E\,C = \sum_{i=1}^{n}\sum_{j=1}^{m}\sum_{k=1}^{n} P_{i,j} \cdot T_{i,j} \cdot x_{i,j,k} + P_0 \cdot C_{max} \tag{2.2.4}$$

La fonction objectif est la minimisation de la consommation totale d'énergie :

Fct Obj = TEC (2.2.5)

Fct Obj = $P\,E\,C + C\,E\,C$ (2.2.6)

Fct Obj= $\sum_{i=1}^{n}\sum_{j=1}^{m}\sum_{k=1}^{n} P_{i,j} \cdot T_{i,j} \cdot x_{i,j,k} + P_0 \cdot C_{max}$ (2.2.7)

2.3.2. Modélisation du problème flow shop avec PM fixe : $Fm|nr - FI|_{TEC}$

Dans le cas où les intervalles d'indisponibilité sont fixés périodiquement, est désigné comme suit :

- les intervalles de non-disponibilité ou bien les périodes de la maintenance sont fixées périodiquement, est noté $\mathrm{Fm|nr-FI|}_{TEC}$.
- Le temps entre deux intervalles de non-disponibilité consécutifs dans $\mathrm{M_j}$ est $\mathrm{TBF_j}$ et le temps de maintenance est $\mathrm{PM_j}$.
- Le $lième$ intervalle de non-disponibilité peut être calculé comme suit : $lième = [\mathrm{l\ TBF_j} + (\mathrm{l-1})\ \mathrm{PM_j}\ ,\ \mathrm{l\ (TBF_j\ +\ PM_j)}]$.

Une illustration de ce problème est donnée par la figure 2.15. Nous avons trois, quatre et trois des lots à exécuter sur les machines M1, M2, M3 et M4, respectivement. Dans M1, la période de la maintenance préventive $\mathrm{TBF_1}$ contient $Q_{l,1}$ et $G_{l,1}$.

Dans $\mathrm{M_j}$ ($\forall\ \mathrm{j}\ \neq 1$), la période $\mathrm{TBF_j}$ contient trois parties : les temps de traitement totaux des tâches $Q_{l,j}$; les temps d'inactivités tels que I_1 et I_2, car la tâche ne peut pas démarrer dans $\mathrm{M_j}$ avant son heure de fin dans $\mathrm{M_{j-1}}$ et les temps d'inactivité tels que I_3 , car la tâche ne peut pas être traitée dans les intervalles d'indisponibilité. On obtient un ordonnancement avec une unité de temps de 170 unités de temps. Le Makespan ou le temps d'achèvement de toutes les tâches est égale à 170 unités de temps. Il est évident que tous les lots de $M1$ sont des "lots réels". Il peut exister un "lot vide" en $M1$ ($j > 1$).

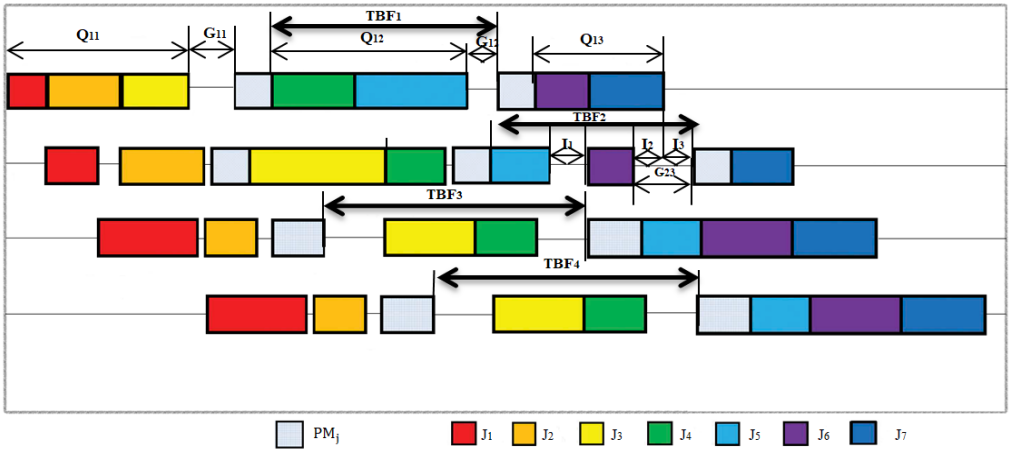

Figure 2.16 : Planning du problème étudié flow shop avec PM fixe $\mathbf{Fm|nr-FI|_{TEC}}$

Le modèle proposé relatif au problème $Fm|nr-FI|_{TEC}$ peut finalement être établi comme suit :

Minimiser **Fct Obj**= $\sum_{i=1}^{n}\sum_{j=1}^{m}\sum_{k=1}^{n} \mathrm{P_{i,j}}\ .\ \mathrm{T_{i,\,j}}\ .\ \mathrm{x_{i,j,k}} + \mathrm{P_0}\ .\ C_{max}$ (2.2.8)

Sous les contraintes suivantes :

$\sum_{i=1}^{n} \mathrm{x_{i,j,k}} = 1$; $\forall\ \mathrm{j,k}$ (2.2.9)

$\sum_{k=1}^{n} \mathrm{x_{i,j,k}} = 1$; $\forall \mathrm{j,i}$ (2.2.10)

Les contraintes (2.2.9) et (2.2.10) garantissent que chaque tâche ne peut être placée qu'à une seule position de la séquence de chaque machine, et qu'une seule tâche peut être placée à chaque position, respectivement.

$\mathrm{T_{k,j}} = \sum_{i=1}^{n} \mathrm{x_{i,j,k}}\ .\ \mathrm{T_{i,j}}$; $\forall\ \mathrm{k}\ ,\ \forall\ \mathrm{j}$ (2.2.11)

La contrainte (2.2.11) spécifie le temps de traitement de l'opération $O_{k,j}$.

$$C_{k,j} = S_{k,j} + T_{k,j} \quad ; \forall j > 1 , \forall k \tag{2.2.12}$$

La contrainte (2.2.12) établit le lien entre l'heure de début et l'heure de fin de $O_{k,j}$.

$$S_{1,1} = 0 \tag{2.2.13}$$

$$S_{k,j} \geq C_{k-1,j} \quad ; \forall j , \forall k \geq 2 \tag{2.2.14}$$

Les contraintes (2.2.13) et (2.2.14) garantissent que la kème tâche ne peut pas démarrer avant l'heure de fin de la tâche précédente dans M_j.

$$\left(2 - x_{i,j,k} - x_{i,j+1,k'}\right) Z \geq S_{k,j} + T_{i,j} - S_{k',j+1}; \forall j < m , i, k, k' \tag{2.2.15}$$

La contrainte (2.2.15) garantit que l'heure de début de la tâche i dans M_{j+1} n'est pas antérieure à son heure de fin dans M_j.

$$C_{k,j} = e_{k,j} + \left(PM_j + TBF_j\right) \sum_{k'=1}^{k-1} g_{k',j} + \left(PM_j + TBF_j\right) \sum_{k'=1}^{k-1} q_{k',j}; \forall j , \forall k \geq 1 \tag{2.2.16}$$

$$C_{1,j} = e_{1,j} + \left(PM_j + TBF_j\right) q_{1,j}; \forall j \tag{2.2.17}$$

Les contraintes (2.2.16) et (2.2.17) représentent le temps d'arrivée de $O_{k,j}$ qui est égal à la somme du temps écoulé de $O_{k,j}$ et des temps des lots précédant $O_{k,j}$, y compris les lots réels et les lots vides.

$$q_{k,j} \leq g_{k-1,j} \; Z \quad ; \forall j , \forall k > 1 \tag{2.2.18}$$

La contrainte (2.2.18) garantit qu'aucun lot vide n'existe entre $O_{k-1,j}$ et $O_{k,j}$ lorsque $O_{k-1,j}$ n'est pas la dernière tâche d'un lot réel.

$$e_{k,j} \geq T_{k,j} \quad ; \forall k , \forall j \tag{2.2.19}$$

La contrainte (2.2.19) garantit que le temps écoulé de la tâche est supérieur à son temps de traitement.

$$e_{k,j} \leq TBF_j \quad ; \forall k , \forall j \tag{2.2.20}$$

La contrainte (2.2.20) garantit qu'aucune tâche ne peut être traitée pendant les intervalles d'indisponibilité.

$$e_{k+1,j} \geq e_{k,j} + T_{k+1,j} - g_{k,j} \; Z; \forall k < n , \forall j \tag{2.2.21}$$

La contrainte (2.2.21) garantit que le temps écoulé de $O_{k+1,j}$ est supérieur à la somme du temps de traitement de $O_{k+1,j}$ et du temps écoulé de $O_{k,j}$ s'ils sont dans le même lot.

$$C_{max} = C_{n,m} \tag{2.2.22}$$

La contrainte (2.2.22) confirment que le makespan est égal au temps d'achèvement de la nième tâche de la machine.

$$x_{i,j,k} , g_{k,j} \quad \text{sont des variables binaires} \tag{2.2.23}$$

La contrainte (2.2.23) définit les restrictions binaires pour $x_{i,j,k}$ et $g_{k,j}$ respectivement.

$$q_{k,j} \quad est\ un\ entier \tag{2.2.24}$$

$$T_{k,j} , C_{k,j} , S_{k,j} , e_{k,j} \geq 0 \tag{2.2.25}$$

2.3.3. Modélisation du problème flowshop avec PM flexible : $\mathbf{Fm|nr-CI|_{TEC}}$

Dans le cas où le temps de travail continu des machines, sans tenir compte du temps d'inactivité (temps mort), ne peut pas dépasser un temps maximum deTBF_j , est désigné par $\mathbf{Fm|nr-CI|_{TEC}}$ **.** De toute

évidence, il n'y a pas d'écart entre la dernière tâche d'un lot et la période de la maintenance suivante, c'est-à-dire $G_{l,j} = 0$. Tous les lots de toutes les machines sont des «lots réels». Dans ce modèle, la stratégie PM est basée sur l'exécution plutôt que sur le temps. L'âge de la machine augmente avec les tâches de traitement et ne change pas lorsque la machine est inactive. Après la maintenance, l'âge de la machine devient 0. Les contraintes d'indisponibilité peuvent être représentées par le fait que l'âge de la machine doit être inférieur à TBF_j à tout moment de l'horizon d'ordonnancement. En attendant, le responsable doit déterminer les heures de début des maintenances. Une illustration de ce modèle est donnée à la figure 2.16. Il est évident que $Q_{l,j} \leq TBF_j$. Un programme avec un temps d'achèvement de toutes les taches de 108 unités de temps est obtenu.

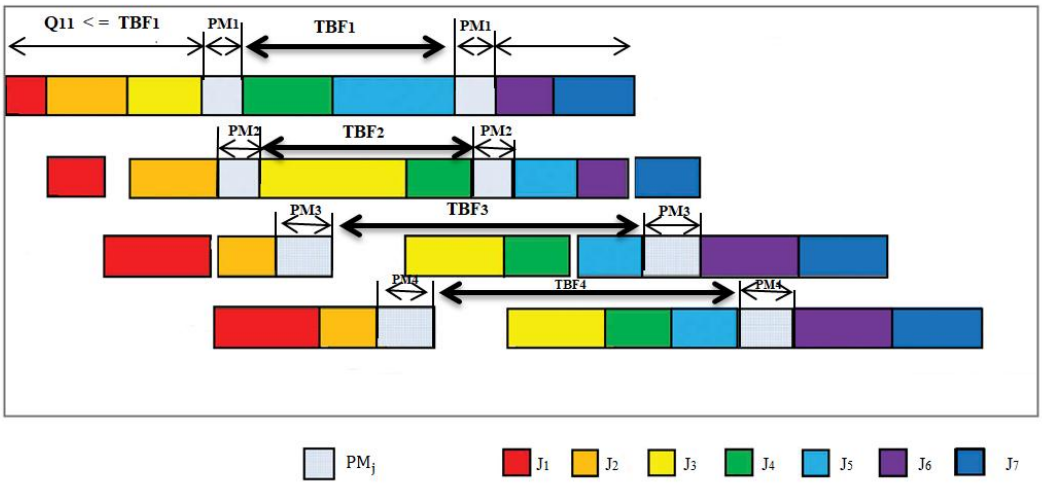

Figure 2.17 : Planning pour le problème flowshop avec PM flexible $Fm|nr - CI|_{TEC}$

Le modèle relatif au problème $Fm|nr - CI|_{TEC}$ peut finalement être établi comme suit :

Minimiser **Fct Obj**= $\sum_{i=1}^{n}\sum_{j=1}^{m}\sum_{k=1}^{n} P_{i,j} \cdot T_{i,j} \cdot x_{i,j,k} + P_0 \cdot C_{max}$ (2.2.8)

Sous les contraintes suivantes :

Les contraintes (2.2.9) et (2.2.13) et la contrainte (2.2.15) sont identiques du modèle précèdent de PM fixe.

$S_{k,j} \geq C_{k-1,j} + PM_j \cdot y_{k,j}$; $\forall j, \forall k \geq 2$ (2.2.26)

La contrainte (2.2.26) garantit que l'opération $O_{k,j}$ ne doit pas commencer avant la somme de l'heure de fin du job précédent immédiat dans Mj et du temps de maintenance possible.

$b_{1,j} = 0$; $\forall j$ (2.2.27)

$y_{1,j} = 0$; $\forall j$ (2.2.28)

Les contraintes (2.2.27) et (2.2.28) spécifient l'état initial du système.

$a_{k,j} = b_{k,j} + T_{k,j}$; $\forall k, \forall j$ (2.2.29)

$b_{k+1,j} = a_{k,j}(1 - Y_{k+1,j})$; $\forall j, k \leq n$ (2.2.30)

Les contraintes (2.2.29) et (2.2.30) spécifient l'âge des machines avant et après chaque opération $O_{k,j}$, respectivement.

$$a_{k,j} \leq TBF_j \quad ; \forall k , \forall j \qquad (2.2.31)$$

La contrainte (2.2.31) garantit que le temps de travail continu des machines ne sera pas supérieur à TBFj.

$$x_{i,j,k} , y_{k,j} \quad \text{sont des variables binaires} \qquad (2.2.32)$$

La contrainte (2.2.32) définit les restrictions binaires pour $x_{i,j,k}$ et $y_{k,j}$ respectivement.

$$T_{k,j} , C_{k,j} , S_{k,j} \geq 0 \qquad (2.2.33)$$

2.3.4. Résolution des problèmes : $\mathbf{Fm|nr-FI|_{TEC}}$ || $\mathbf{Fm|nr-CI|_{TEC}}$

2.3.4.1. Essais et résultats numérique

Cette partie est consacrée à l'analyse exacte de la performance du modèle linéaire correspondant au système étudié. En effet, les modèles mathématiques $Fm|nr-FI|_{TEC}$ et $Fm|nr-CI|_{TEC}$ représentent une programmation linéaire pour lesquelles une résolution exacte à travers une méthode de séparation et d'évaluation intégrée dans le solveur CPLEX 12.6 de la programmation linéaire est nécessaire pour qualifier la complexité et l'état d'optimalité du problème considéré.

Afin d'évaluer la puissance de calcul du modèle proposé, il convient d'examiner le problème dans les cas les plus difficiles. En effet, 39 instances différentes pour chaque dimension fixée de n jobs et m machines ont été générées. Les temps de traitement des tâches $T_{i,j}$ sont des entiers générés uniformément à partir de l'intervalle$[9, 29]$.

La période de temps TBF_j est générée uniformément à partir d'un intervalle $[\underline{TBF_j} , \overline{TBF_j}]$, là où TBF_j est réglé sur 30 et TBF_j est fixé à la valeur maximale de 30 et la moitié du temps de traitement totale des tâches dans machine j. Le temps de maintenance PM_j est généré uniformément à partir d'un intervalle $\left[\underline{PM_j}, \overline{PM_j}\right] = \left[\frac{TBF_j}{5}, \frac{2 \times TBF_j}{3}\right]$.

Nous supposons pour les problèmes de petite taille que la puissance des installations auxiliaires est égale à $P_0 = 5$; Pour les cas des problèmes de grande taille, cette puissance commune P_0 est paramétrée sur 5 , 15 et 20. La puissance de traitement est générée uniformément à partir de l'intervalle $[3, 5]$. La taille du problème (n, m) est réglée comme dans le tableau 2.6. Pour chaque combinaison des paramètres, trois instances sont générées d'une manière aléatoire pour les problèmes de grande taille. Ces instances sont basées sur la variation de la puissance commune des installations auxiliaires pour $P_0 = 5$, $P_0 = 15$ et $P_0 = 20$. Le tableau 2.8 rapporte les temps de calcul moyens obtenus du CPU en secondes en utilisant le logiciel CPLEX 12.6 pour trouver la consommation totale d'énergie optimale des problèmes d'ordonnancement intégré des tâches de la production et de la maintenance préventive. Pour avoir plus de clairvoyance sur la capabilité du modèle précité, des études comparatives des temps de calcul moyens entre les problèmes de petite taille et de grande taille sont effectuées comme illustré sur le tableau 2.8. Toutes les formulations MILP sont modélisées en utilisant IBM ILOG CPLEX12.6 et le langage OPL. Les 39 instances sont résolues sur un ordinateur portable HP 4300U doté d'un processeur Intel Core i5 Duo cadencé à 2,50 GHz et de 8 Go de mémoire RAM. La limite de temps est fixée à 3600 secondes. En d'autres termes, les analyses sont terminées après 3600 secondes. Si aucune solution optimale n'est obtenue dans les 3600 secondes, la meilleure solution actuelle est renvoyée.

Tableau 2.8 : Récapitulatif des résultats de calcul

								$Fm\|nr-Fl\|_{TEC}$			$Fm\|nr-Cl\|_{TEC}$		
(n, m)			TBF	PM	T	P_0	P	C_{max}	TEC	time (s)	C_{max}	TEC	time (s)
5	**2**		[30,102]	[6,68]	[9,29]	5	[3,5]	159	1529	00,38	129	1329	00,36
	3							186	2155	03,49	154	1955	02,47
	4							182	2550	04,06	176	2350	03,05
	5							210	2956	04,82	182	2856	03,80
	6							254	3444	05,41	210	3344	04,40
6	**2**		[30,117]	[6,78]	[9,29]	5	[3,5]	178	1879	01,97	140	1678	00,96
	3							223	2876	05,33	163	2677	04,32
	4							243	2978	05,94	183	2778	04,93
	5							286	3568	07,08	226	3367	06,07
7	**2**		[30,131]	[6,87]	[9,29]	5	[3,5]	202	2176	07,37	174	1977	06,36
	3							223	2957	16,57	187	2756	14,56
	4							264	3670	13,16	234	3479	10,15
8	**2**		[30,146]	[6,97]	[9,29]	5	[3,5]	210	2573	13,48	190	2373	11,49
	3							267	3174	13,59	267	2974	11,39
9	**2**		[30,160]	[6,106]	[9,29]	5	[3,5]	289	2816	40,38	262	2616	32,35
20	**15**	Sc. 1	[30,320]	[6,213]	[9,29]	10	[3,5]	648	29460	60,02	646	29260	54,26
		Sc. 2				15			**32694**	**87,23**		**32490**	**75,91**
		Sc. 3				20			35925	93,22		35720	89,87
20	**20**	Sc. 1	[30,320]	[6,213]	[9,29]	10	[3,5]	941	38013	83,12	741	37810	79,56
		Sc. 2				**15**			**41716**	**120,09**		**41515**	**91,85**
		Sc. 3				20			45422	143,23		45220	102,78
30	**15**	Sc. 1	[30,465]	[6,310]	[9,29]	10	[3,5]	1036	42761	98,43	836	42560	84,09
		Sc. 2				15			**46940**	**176,66**		**46740**	**95,12**
		Sc. 3				20			51021	187,65		50920	120,77
30	**20**	Sc. 1	[30,465]	[6,310]	[9,29]	10	[3,5]	1131	55915	1200,17	931	54910	1100,90
		Sc. 2				**15**			**59865**	**1856,26**		**59565**	**1694,21**
		Sc. 3				20			64825	1944,54		64220	1884,11
40	**15**	Sc. 1	[30,610]	[6,406]	[9,29]	10	[3,5]	1226	55960	1432,77	1026	55860	1322,19
		Sc. 2				15			**61090**	**2599,16**		**60990**	**2030,25**
		Sc. 3				20			66321	2643,22		66120	2367,45
40	**20**	Sc. 1	[30,610]	[6,406]	[9,29]	10	[3,5]	1321	72313	1532,12	1121	72010	1400,69
		Sc. 2				**15**			**77916**	**2733,01**		**77615**	**2279,88**
		Sc. 3				20			85300	2876,23		83220	2739,16
50	**15**	Sc. 1	[30,755]	[6,503]	[9,29]	10	[3,5]	—		3600	—		2986,25
		Sc. 2				15				**3600**			**3044,44**
		Sc. 3				20				3600			3432,70
50	20	Sc. 1	[30,755]	[6,503]	[9,29]	10	[3,5]			**3600**			**3600**
		Sc. 2				15				3600			3600
		Sc. 3				20				**3600**			**3600**

Dans le contexte de nos deux modèles de MILP proposés, la solution optimale peut être trouvée en un temps record dans des temps de calcul raisonnables. Cependant, dans le cas d'un problème important, ces modèles nécessitent un temps relativement excessif.

2.3.4.2. Validation de la méthode de séparation et d'évaluation (B&B)

Après avoir étudié les problèmes d'ordonnancement des ateliers flow shop de production en cas de non-permutation avec des intervalles de non disponibilité, les auteurs [WEI, 2016] et [SAD, 2019a] suggèrent pour résoudre leur problème un algorithme génétique (GA), un algorithme génétique incrémental hybride (HIGA) qui combine un cadre stratégique d'évolution incrémentielle, un raffinement local et un schéma de suivi de la diversité de la population, avec une résolution précise grâce au logiciel CPLEX.

Les auteurs [WEI, 2016], [SAD, 2019a] se sont basés sur la minimisation du makespan et sur le fait qu'ils n'intègrent pas des contraintes énergétiques dans leur modèle, ce qui différencie clairement ce dernier de nos modèles. Au niveau de l'atelier de flow shop de non permutation, jusqu'à présent, aucun document de référence ne prend en compte à la fois la programmation simultanée des tâches de production et de maintenance de durée fixe et flexible sous contraintes énergétiques.

Le tableau 2.9 illustre les résultats numériques de l'étude comparative avec la résolution exacte fournie par CPLEX sur la base des modèles existants $\mathrm{Fm|nr-FI|}_{C_{max}}$ et $\mathrm{Fm|nr-CI|}_{C_{max}}$ ainsi que nos modèles $\mathrm{Fm|nr-FI|}_{TEC}$ et $\mathrm{Fm|nr-CI|}_{TEC}$ dont la consommation totale d'énergie a été minimisée, comme indiqué dans le tableau 2.9.

Tableau 2.9 : Comparaison des résultats obtenus

	$\mathbf{Fm\|nr-FI\|_{TEC}}$			$\mathrm{Fm\|nr-FI\|}_{C_{max}}$		$\mathbf{Fm\|nr-CI\|_{TEC}}$			$\mathrm{Fm\|nr-CI\|}_{C_{max}}$	
(n , m)	$\mathbf{C_{max}}$	**TEC**	Time(s)	$\mathbf{C_{max}}$	Time(s)	$\mathbf{C_{max}}$	**TEC**	Time(s)	$\mathbf{C_{max}}$	Time(s)
5 2	**159**	1529	00,36	172,6	00,38	**129**	1329	00,38	149,4	**00,19**
3	**186**	2155	02,47	199,6	05,79	**154**	1955	03,49	169,6	02,82
4	**182**	2550	03,05	249,4	26,4	**176**	2350	04,06	191,4	12,2
5	**210**	2956	03,80	286,2	378,8	**182**	2856	04,82	222,0	217,9
6	**254**	3444	04,40	317,6	2818	**210**	3344	05,41	225,8	4210
6 2	**178**	1879	00,96	208,4	3,05	**140**	1678	01,97	174,6	1,93
3	**223**	2876	04,32	237,8	31,4	**163**	2677	05,33	193,0	65,2
4	**243**	2978	04,93	278,43	256,9	**183**	2778	05,94	220,6	306
5	**286**	3568	06,07	12,4	2632	**226**	3367	07,08	231,6	5132
7 2	**202**	2176	06,36	213,2	7,64	**174**	1977	07,37	198,4	70,7
3	**223**	2957	14,56	262,4	835,7	**187**	2756	16,57	248,4	1359
4	**264**	3670	10,15	293,0	1434	**234**	3479	13,16	231,9	6079
8 2	**210**	2573	11,48	242,2	88,3	**190**	2373	13,48	221,6	980,7
3	**267**	3174	11,59	278,2	4934	**267**	2974	13,59	199,4	7200
9 2	**289**	2816	12,35	250,6	681,3	**262**	2616	40,38	234,6	4653

Les résultats issus de la méthode exacte de séparation et d'évaluation intégrée dans le logiciel CPLEX prouvent que les modèles MILPs suggérés visant à minimiser la consommation totale d'énergie ont fourni des résultats satisfaisants au regard de ceux trouvés par [WEI, 2016]. Par ailleurs, dans la mesure où la consommation d'énergie est minimisée, on observe une réduction considérable du temps d'exécution de toutes les tâches.

2.3.5. Analyse des résultats

Par rapport aux deux problèmes considérés $Fm|nr-FI|_{TEC}$ et $Fm|nr-CI|_{TEC}$, les temps moyens de calcul sont relativement raisonnables (moins de 60 secondes) du moment où la taille du problème est inférieure à 9*2 (9 jobs et 2 machines). Dès que la taille est supérieure à 9*2, les temps de calculs deviennent très importants pour les deux problèmes considérés comme illustré dans la figure 2.18.

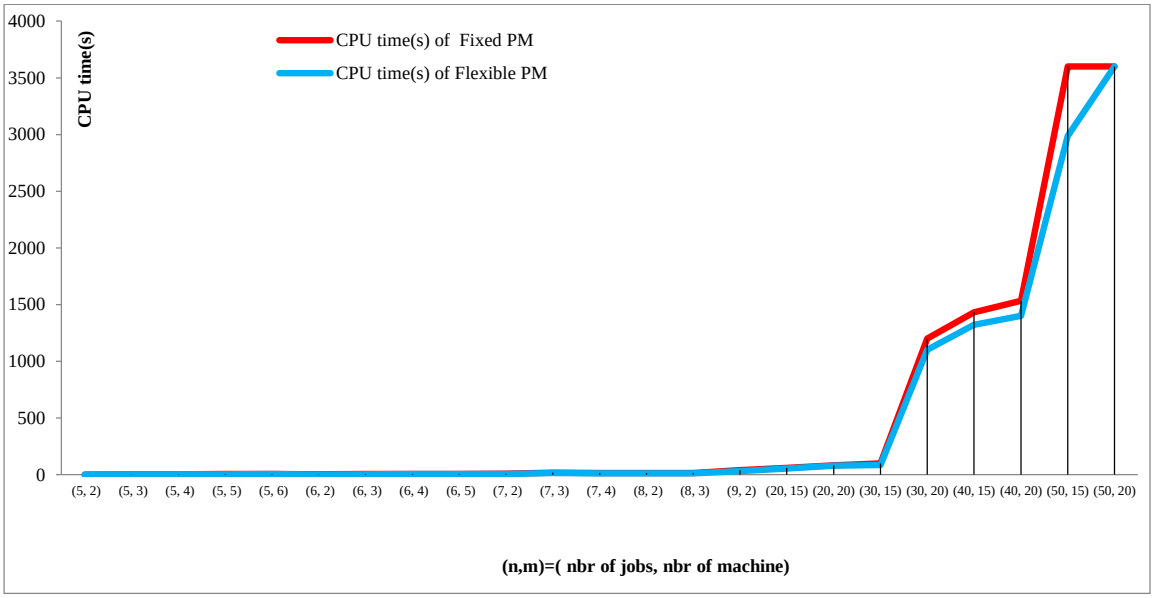

Figure 2.18 : Temps moyens d'exécution pour les différentes instances

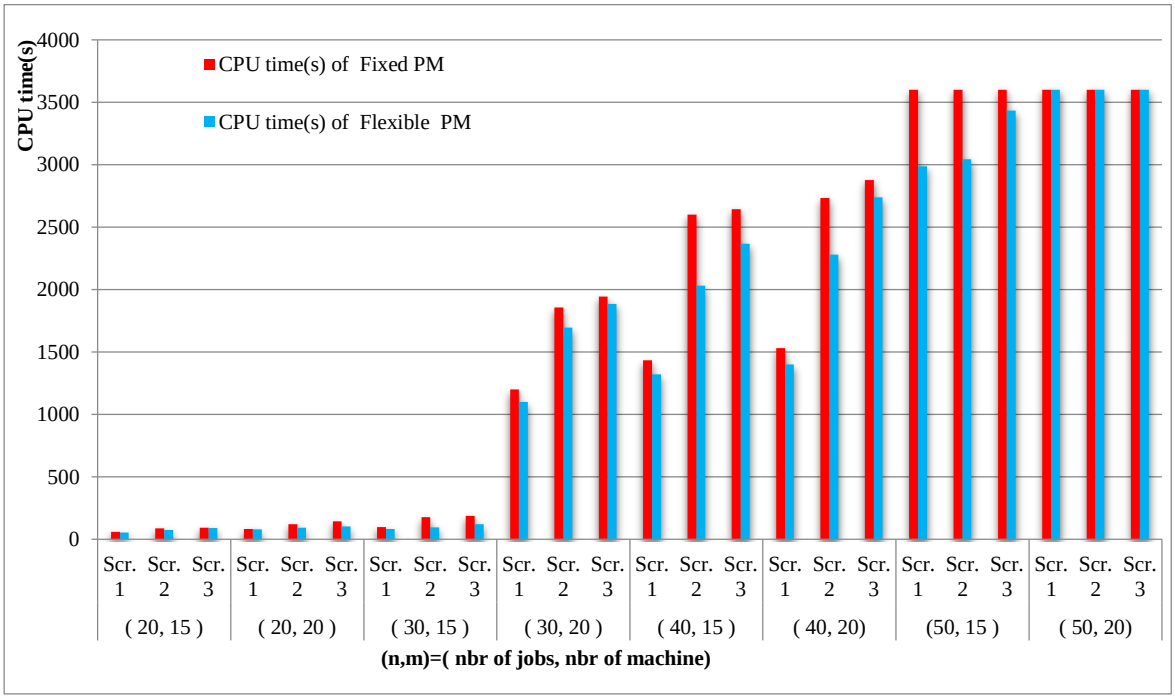

Figure 2.19 : Comparaison des temps moyens d'exécution pour les deux cas des problèmes considérés

La figure 2.19 montre que les temps de calcul moyens sont relativement raisonnables pour les problèmes de grande taille (moins de 3000 secondes) du moment où le problème est inférieure à 50 tâches. Dès que la taille est égale à 50 tâches, les temps de calcul deviennent très importants. À titre d'exemple, pour la troisième instance du problème (50 tâches, 15 machines), le temps de réalisation pour le premier cas $Fm|nr-FI|_{TEC}$ est de 3600 secondes et pour le 2éme cas $Fm|nr-CI|_{TEC}$ est de 3432,7 secondes.

2.3.5.1. Analyse des problèmes de petite taille

Pour illustrer davantage l'impact du TEC sur le Cmax, une étude comparative de l'évolution de la consommation totale d'énergie et du makespan en fonction des temps moyens d'exécution est établie pour les problèmes de petites tailles pour les deux cas étudiés $\mathrm{Fm|nr-FI|_{TEC}}$ et $\mathrm{Fm|nr-CI|_{TEC}}$ comme illustré dans la figure 2.20. De plus, du fait que les valeurs du TEC sont beaucoup plus importantes que celles du Cmax, une illustration meilleure des valeurs du Cmax pour les deux cas étudiés est présentée sur la figure 2.21.

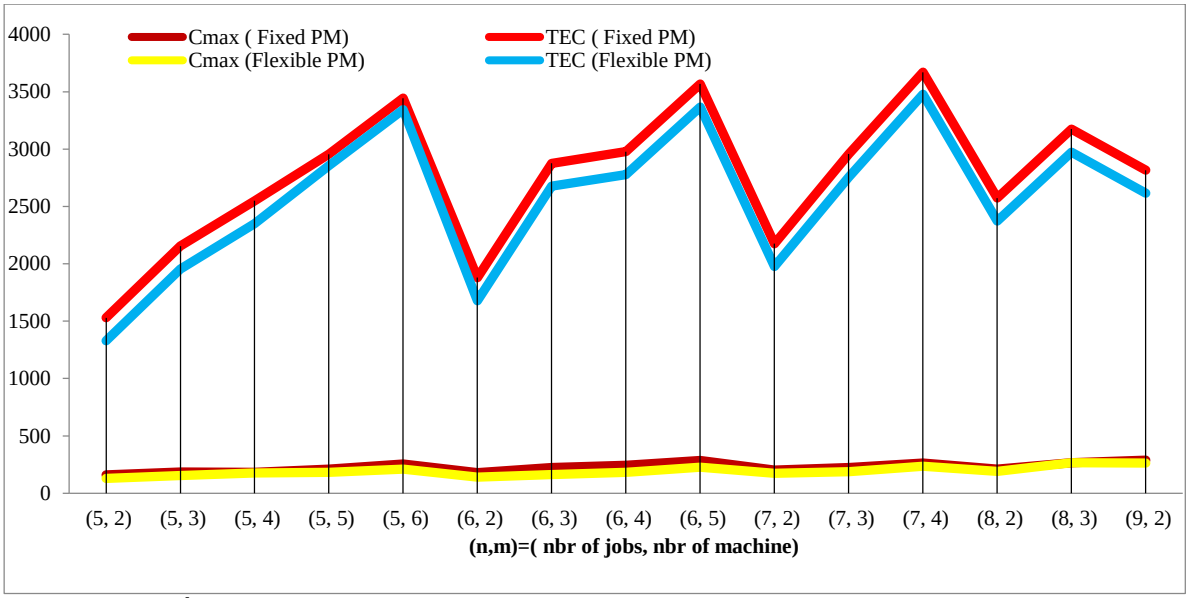

Figure 2.20 : Évolution de la consommation totale d'énergie et du Makespan en fonction des temps moyens d'exécution pour les deux cas des problèmes de petite taille

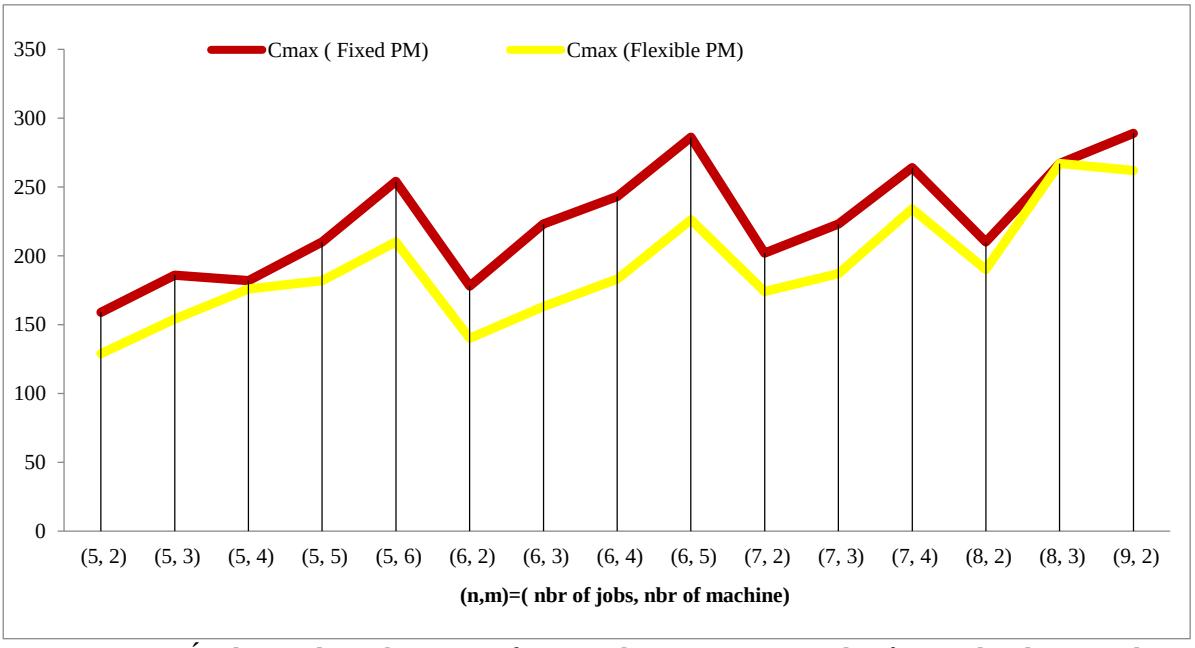

Figure 2.21. Évolution du Makespan en fonction des temps moyens d'exécution les deux cas des problèmes de petite taille

D'après la figure 2.20, on constate que si on fixe le nombre des machines et on varie le nombre des tâches, une petite variation au niveau de la TEC est aperçue. En outre, si l'on prend par exemple le cas des instances (5,2) (6,2) (7,2) (8,2) (9,2), nous remarquons une variation très faible au niveau de la

consommation énergétique pour le cas du premier problème $Fm|nr-FI|_{TEC}$ qui est (1529, 1879, 2176, 2573 et 2816); respectivement. De même, pour le cas du deuxième problème $Fm|nr-CI|_{TEC}$ les valeurs du TEC est (1329, 1678, 1977, 2373 et 2616); respectivement.

Analogue pour le cas ou uniquement le nombre de job qui change, le constat est le même. À titre s'exemple pour les problèmes de taille (5,3) (6,3) (7,3) (8,3), la consommation énergétique (TEC) est de l'ordre de (2155, 2876, 2957 et 3174) respectivement pour le premier cas de problème$Fm|nr-FI|_{TEC}$ et de même pour le deuxième cas $Fm|nr-CI|_{TEC}$ la consommation énergétique est de l'ordre de (1955, 2677, 2756 et 2974) respectivement. Par contre, au fur et à mesure que le nombre de machines augmentent, on remarque une variation considérable au niveau de la fonction objectif (TEC). Le constat ressortit est que généralement le nombre de machines utilisé dans le traitement des tâches influe significativement sur la valeur optimale de la consommation énergétique. Quant au makespan, les valeurs fournies dans le tableau 2.8, les figures 2.20 et 2.21 montrent que l'augmentation de la date d'achèvement finale de toutes les tâches engendre pratiquement une augmentation considérable au niveau de la consommation énergétique. Pour les instances (5,2) (5,3) (5,4) (5,5) et (5,6) le temps d'achèvement de toutes les tâches C_{max} est égale à (159, 186, 182, 210 et 254) et la consommation énergétique résultante est de (1529, 2155, 2550, 2956 et 2816) respectivement pour le premier cas de problème$Fm|nr-FI|_{TEC}$ et de même pour le deuxième cas du problème $Fm|nr-CI|_{TEC}$ le temps d'achèvement de toutes les tâches C_{max} est égale à (129, 154, 176, 182 et 210) et la consommation énergétique résultante est de (1329, 1955, 2350, 2856 et 3344); respectivement comme on a montré dans le tableau 2.8.

2.3.5.2.Analyse des problèmes de grande taille

Même résonnement est fait pour les problèmes de grande taille des deux cas étudiés $Fm|nr-FI|_{TEC}$ et $Fm|nr-CI|_{TEC}$. Une étude comparative de l'évolution de la consommation totale d'énergie et du makespan en fonction des temps moyens d'exécution est établie pour les problèmes de grandes tailles pour illustrer davantage l'impact du TEC sur le Cmax comme illustré dans la figure 2.22. De plus, du fait que les valeurs du TEC sont beaucoup plus importantes que celles du Cmax, une illustration meilleure des valeurs du Cmax est présentée sur la figure 2.22.

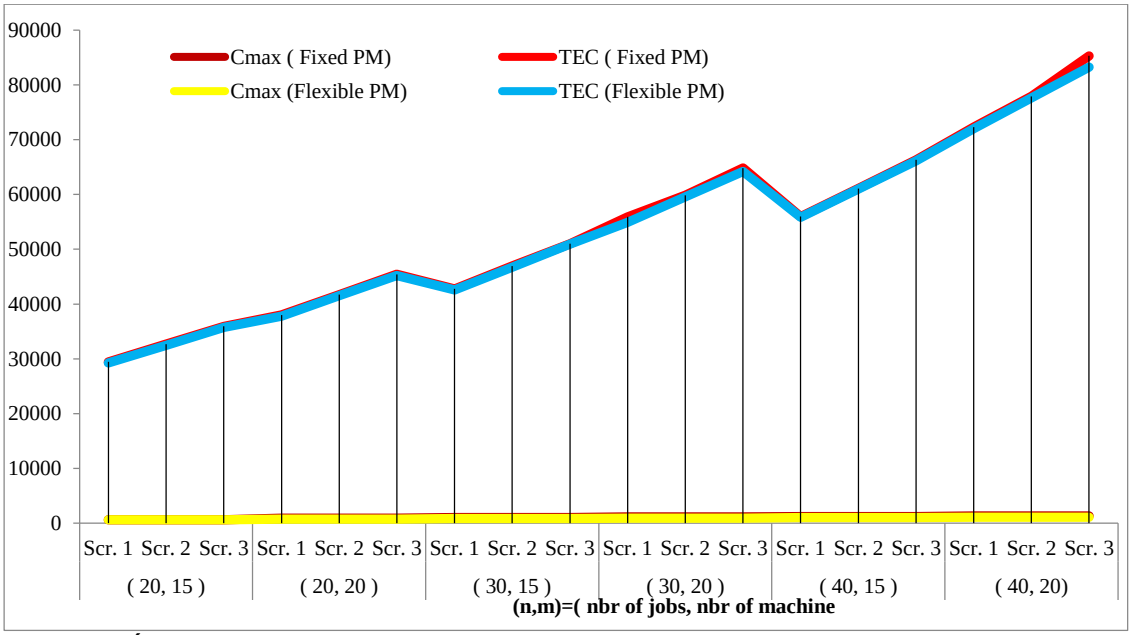

Figure 2.22 : Évolution de la consommation totale d'énergie et du Makespan en fonction des temps moyens d'exécution pour les deux cas des problèmes de grande taille

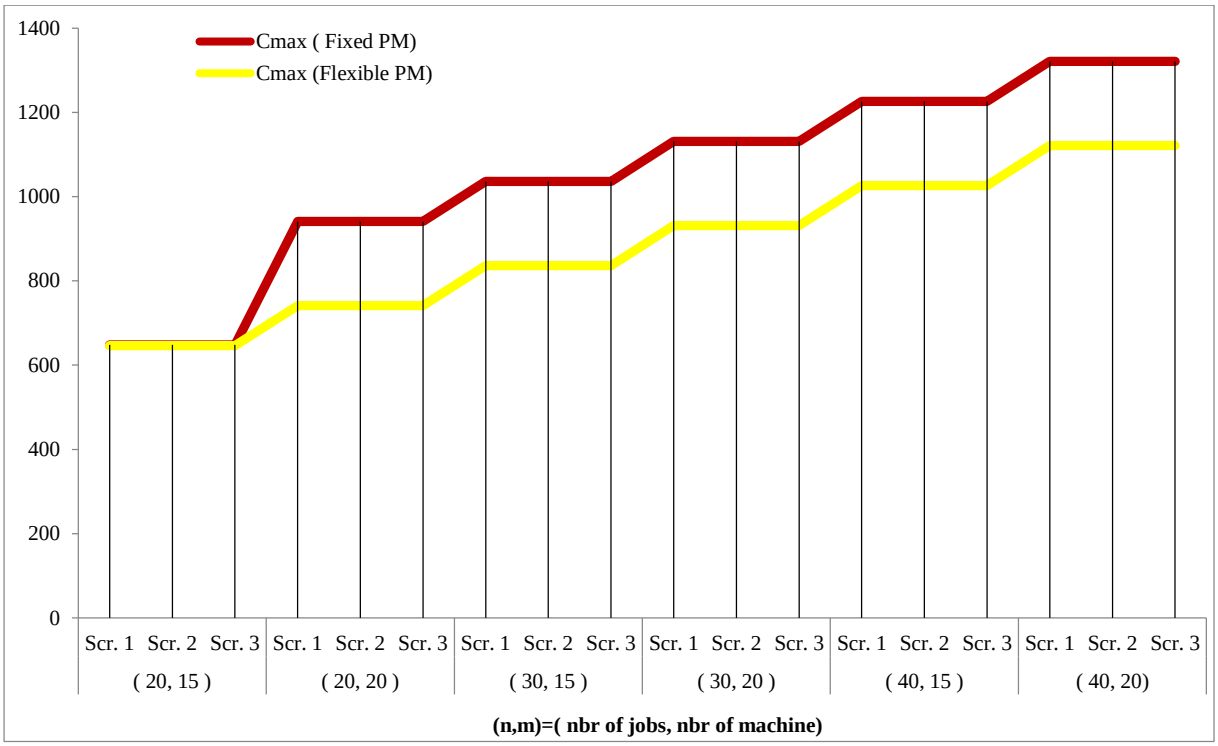

Figure 2.23 : Évolution du Makespan en fonction des temps moyens d'exécution pour les deux cas des problèmes de grande taille

Pour les petits problèmes, le même constat s'impose d'après la figure 2.22 et la figure 2.23, la variation de la consommation énergétique dépend du type d'atelier étudié et du nombre des tâches exécuté. Comme illustré sur les deux figures, en augmentant la puissance commune des installations auxiliaires de l'atelier, une hausse considérable de l'énergie consommée est constatée, et en tenant compte du passage du premier scénario P0=10 vers le deuxième P0=15, la valeur du TEC a connu une augmentation de 29460 à 32694 pour le premier cas $\mathbf{Fm|nr-FI|_{TEC}}$ et de même pour le deuxième cas $\mathbf{Fm|nr-CI|_{TEC}}$ la valeur du TEC a connu une augmentation de 29260 à 32490.

En effet, On constate aussi d'après la figure 2.22 que si on fixe le nombre des machines et on varie le nombre des tâches comme effectué par exemple sur le 3^{éme} scénario pour les instances (20,15), (30,15) et (40,15), une petite variation au niveau de la TEC est aperçue 35925, 51021 et 66321; respectivement pour le premier cas $Fm|nr-FI|_{TEC}$ et de même pour le deuxième cas $Fm|nr-CI|_{TEC}$ 35720, 50920 et 66120; respectivement. Par contre, au fur et à mesure que le nombre de machines augmentent, on remarque une variation considérable au niveau de la fonction objectif (TEC). À titre d'exemple, pour le 3^{éme} scénario du premier cas $Fm|nr-FI|_{TEC}$ avec ($P_0 = 20$) pour les instances (20,15) et (20,20) l'augmentation de la consommation énergétique est pratiquement remarquable et égale à 35925 et 45422; respectivement. De même pour le deuxième cas $Fm|nr-CI|_{TEC}$, l'augmentation de la consommation énergétique est pratiquement remarquable et vaut 35720 et 45220; respectivement.

De la même manière, le tableau 2.8 montre que relativement au makespan obtenus pour les problèmes de grandes tailles, les valeurs fournies dans le tableau 2.8 et les figures 2.22 et 2.23 montrent que l'augmentation de la date d'achèvement finale de toutes les tâches engendre une augmentation significative au niveau de la consommation énergétique. À titre d'exemple pour le deuxième scénario du premier cas $Fm|nr-FI|_{TEC}$ avec ($P_0 = 15$) pour des instances (20,15) et (20,20), le temps d'achèvement de toutes les tâches C_{max} est égale à (648 et 941) respectivement et la consommation énergétique suit cette variation avec des valeurs de (32694 et 41716) respectivement. Le même

raisonnement pour le deuxième cas de $Fm|nr-CI|_{TEC}$ avec le même scénario et les même instances, l'augmentation de la consommation énergétique est pratiquement remarquable 35720 et 45220, respectivement pour les instances (20,15) et (20,20).

Nous constatons que les valeurs trouvées de TEC et Cmax par le 1^{ér} cas de problème $Fm|nr-FI|_{TEC}$ sont supérieures que les valeurs trouvées par le 2^{éme} cas du problème $Fm|nr-CI|_{TEC}$ parce que dans le premier cas, où les intervalles d'indisponibilité sont fixés périodiquement par contre dans le second cas, où le temps de travail continu des machines, sans tenir compte du temps d'inactivité (temps mort), ne peut pas dépasser un temps maximum de TBF_j. De toute évidence, il n'ya pas d'écart entre la dernière tâche d'un lot et la période de la maintenance suivante, c'est-à-dire $G_{l,j}=0$ comme mentionnée dans la 2éme section. D'autre part, il est évident que le makespan augmente en fonction de l'augmentation de nombre des taches, par contre sa valeur reste presque négligeable devant la consommation totale d'énergie pour les deux cas $Fm|nr-FI|_{TEC}$ et $Fm|nr-CI|_{TEC}$ comme illustré dans le tableau 2.8 et dans les figures 2.22 et 2.23.

Les figures 2.24 et 2.25 représentent une illustration de la consommation énergétique effectuée à travers le logiciel Matlab dans les différentes configurations de l'atelier flow shop de non–permutation suivante pour les deux cas $\mathbf{Fm|nr-FI|_{TEC}}$ et $\mathbf{Fm|nr-CI|_{TEC}}$: (20jobs, 15machine), (20jobs, 20machine), (30jobs, 15machine), (30jobs, 20machine), (40jobs, 15machine), (40jobs, 20machine), (50jobs, 15machine) et (50jobs, 20machine).

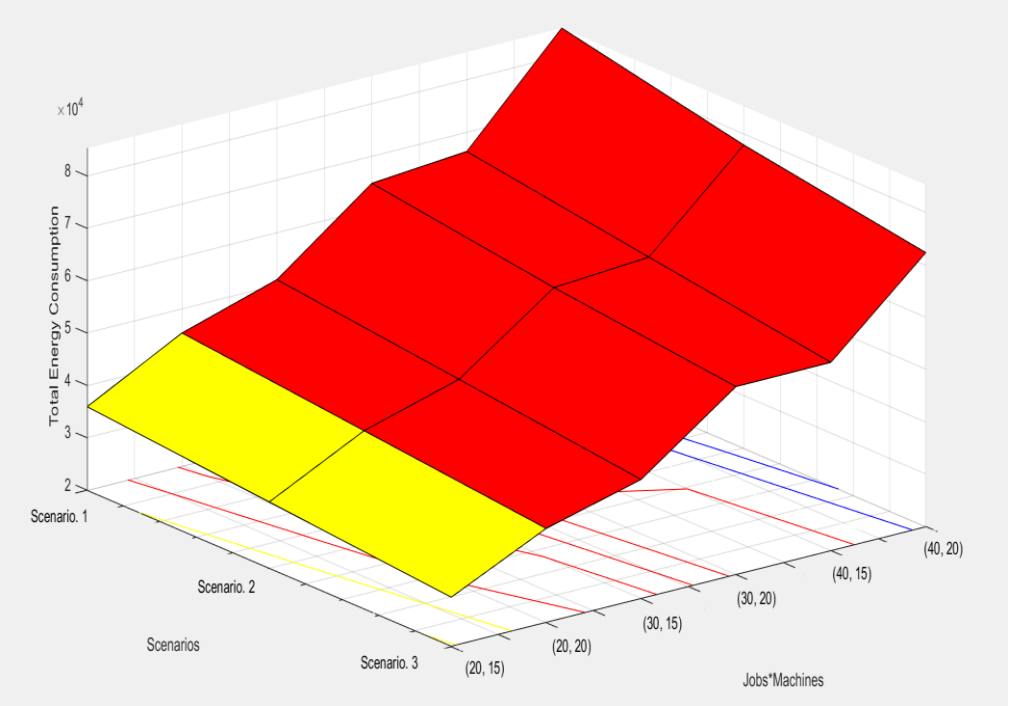

Figure 2.24 : Évolution de la consommation totale d'énergie en fonction des scénarios et des instances pour le 1^{ér} cas des problèmes de grande taille

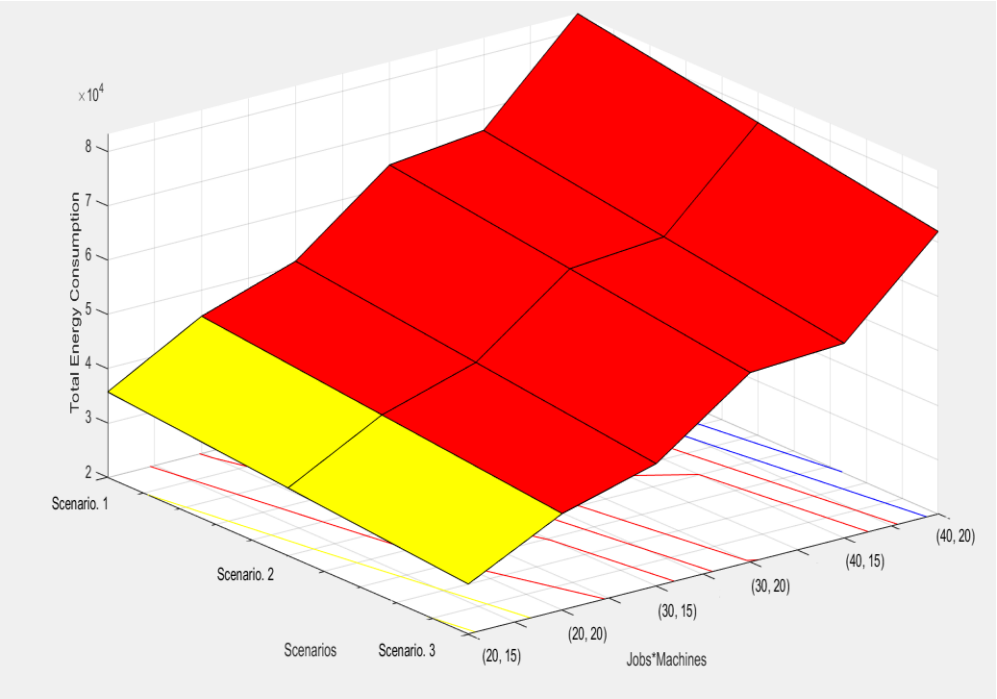

Figure 2.25 : Évolution de la consommation totale d'énergie en fonction des scénarios et des instances pour le 2^{éme} cas des problèmes de grande taille

Cette illustration représente un graphe à 3 dimensions ((n, m), scénario, TEC). La variation aperçue au niveau de la consommation énergétique présentée sur la figure 2.25 prouve que lorsqu'on a une petite puissance des installations auxiliaires comme on a mis dans le premier scénario avec $P_0 = 10$ la valeur de la consommation énergétique sera d'autant moins qu'on met une grande puissance comme montré dans le troisième scénario avec $P_0 = 20$. si l'on prend le cas de premier scénario avec $P_0 = 10$, la consommation énergétique pour ce type d'atelier (20jobs, 15machine) est de 29460, pour $P_0 = 15$, on a comme valeur de TEC 32694 et finalement pour $P_0 = 20$, la valeur de TEC est de 35925; pour le premier cas $Fm|nr - FI|_{TEC}$ et de même pour le deuxième cas $Fm|nr - CI|_{TEC}$, si l'on prend le même cas de premier scénario avec $P_0 = 10$, la consommation énergétique pour ce type d'atelier (20jobs, 15machine) est de 29260, pour $P_0 = 15$, on a comme valeur de TEC 32490 et finalement pour $P_0 = 20$, la valeur de TEC est de 35720; ce qui confirme ce qui est déjà été constatés dans les études de petites et de grandes tailles précitées.

2.4. Conclusion

Nous avons présenté dans ce chapitre les problèmes d'ordonnancement intégré des tâches de production, de maintenance préventive (PM) et de maintenance corrective (CM) dans une seule machine puis dans l'ateliers flow shop à multi machines afin de minimiser la consommation totale d'énergie (TEC). Des modèles mathématiques correspondants sont établis pour minimiser la consommation totale d'énergie.

Nous avons proposé un modèle commun $Sm|nr - CI|_{TEC}$ afin d'intégrer la maintenance préventive (PM) et corrective (CM) dans l'ordonnancement de la production, où la séquence des tâches de production, ainsi que les périodes de maintenance préventive (PM) et les délais prévus pour l'achèvement des tâches sont établis simultanément; cela rend la théorie mise en pratique plus efficace. Sur la base de la méthode exacte Branch and Bound intégrée sur le solveur CPLEX et de l'algorithme génétique (GA) résolu dans le logiciel Python, les performances du modèle de programmation mixte binaire entier proposé sont testées et évaluées. Ce sont plus que des analyses utilisant le logiciel

MATLAB. En effet, après avoir expérimenté numériquement divers paramètres du problème, l'algorithme B&B fonctionne de manière relativement satisfaisante et fournit des résultats précis par rapport à l'algorithme GA. Une étude comparative des résultats a prouvé que le modèle développé était suffisamment efficace.

Tandis que pour le cas de plusieurs machines nous avons développé un algorithme de séparation et évaluation. Cette étude a examiné les propriétés de calcul des modèles MILPs développées pour résoudre de manière optimale les problèmes d'ordonnancement intégré des tâches de la production et de la maintenance préventive de durée fixe et flexible, où l'objectif est de minimiser la consommation totale d'énergie (TEC). La performance des modèles de programmations entières binaires mixtes proposés sont évaluée en se basant sur la méthode exacte de séparation et d'évaluation intégrée sur le solveur CPLEX. Une étude comparative des résultats fournis avec ceux qui existent dans la littérature ont prouvé la performance du modèle développé. Les résultats trouvés ont souligné que l'aspect des MILP développés est sur une grande échelle dans la qualité des temps de calcul. En outre, les MILP suggéré peuvent résoudre de façon optimale le problème dans un délai raisonnable pour un problème de petite taille, mais il implique un temps immodéré. Néanmoins, les résultats sont jugés tolérables puisque la formulation proposée nécessite moins de 3600 secondes de temps de calcul.

Dans ce contexte, le chapitre suivant entamera le déploiement de la stratégie Dynamic Speed Scaling (DSS) dans l'ordonnancement intégré des tâches de la production et de la maintenance sous contraintes d'énergie au sein de l'atelier de permutation « Flow Shop à deux machines» et l'atelier « Flow Shop à m machines» visant à minimiser la consommation totale d'énergie (TEC).

Chapitre 3

Déploiement de la stratégie de l'échelle dynamique de la vitesse "DSS" dans l'ordonnancement conjoint de la production et de la maintenance

Chapitre 3
Déploiement de la stratégie de l'échelle dynamique de la vitesse "DSS" dans l'ordonnancement conjoint de la production et de la maintenance

3.1. Introduction

La technique de mise à l'échelle dynamique de la vitesse a fait l'objet d'une attention particulière dans la littérature récente en tant qu'approche pour équilibrer la consommation d'énergie et diverses autres mesures de performance [SAD, 2020a] et [SAD, 2020b]. Cette technique de mise à l'échelle dynamique de la vitesse a d'abord été étudiée par [YAO,1995]. En cas de problèmes d'ordonnancement à grande vitesse, les vitesses de fabrication des machines peuvent être ajustées dynamiquement si nécessaire. En particulier, une vitesse de traitement plus élevée entraînera une réduction du temps de traitement et une augmentation de la consommation d'énergie. Par conséquent, le choix de vitesses de traitement appropriées pour les machines peut contribuer à réduire considérablement la consommation d'énergie. Les problèmes d'échelle de vitesse ont été étudiés dans la littérature. Par exemple, les auteurs [BAM, 2012] ont proposé un algorithme pour résoudre un problème d'ordonnancement à l'échelle de la vitesse sur une seule machine en envisageant l'utilisation d'un mécanisme de mise hors tension pour minimiser la consommation totale d'énergie. Les auteurs [DAI, 2013] ont étudié un problème d'ordonnancement flexible de l'atelier de fabrication avec un mécanisme de mise hors tension pour réduire la consommation d'énergie totale et ont proposé un algorithme de recuit simulé par simulation génétique. Les auteurs [FAN, 2016] ont examiné les problèmes d'échelonnement de la vitesse sur une seule machine en fonction des tarifs d'électricité en fonction du « temps d'utilisation (TOU) » afin de minimiser le coût total de l'électricité. Les auteurs [DIN, 2016b] ont étudié un problème d'ordonnancement de l'atelier de permutation flow shop à l'échelle de la vitesse afin de minimiser à la fois les émissions totales de carbone et la production. Ils ont développé un algorithme NEH multi-objectif et un algorithme gourmand multi-objectif modifié pour traiter le problème. les auteurs [MAN, 2016] ont étudié un problème d'ordonnancement d'atelier à deux machines avec des temps d'équipement dépendant de la séquence pour minimiser à la fois la portée et la consommation totale d'énergie. Ils ont proposé un modèle de programmation linéaire multi-objectif, mixte et entier, ainsi qu'une heuristique constructive pour parvenir à un compromis entre les deux objectifs. Les auteurs [XUE, 2018] ont étudié un problème bi-objectif avec l'utilisation de stratégie de « DSS » afin de minimiser simultanément le makespan et la consommation d'énergie.

La principale contribution de ce chapitre est le déploiement de la stratégie « Dynamic Speed Scaling » dans l'ordonnancement intégré des tâches de la production et de la maintenance sous contraintes d'énergie. Ce chapitre s'articule principalement autour de la résolution de trois types de problèmes d'ordonnancement. Le premier étant le $F2|prmu - CIV|_{TEC}$ qui permet de minimiser la consommation totale d'énergie au sein de l'atelier de permutation « Flow Shop à deux machines» tandis que la deuxième et le troisième représentent deux types des problèmes relatifs à un ordonnancement sous contraintes d'indisponibilité fixe et flexible au sein de l'atelier de non-permutation « Flow Shop à m machines» visant à minimiser la consommation totale d'énergie (TEC). Les modèles de programmation binaires mixtes en nombres entiers $Fm|nr - FIV|_{TEC}$ et $Fm|nr - CIV|_{TEC}$ sont proposés pour décrire les ordonnancements optimaux avec des PMs fixe et flexible, respectivement. Les performances des trois modèles de programmation binaires mixtes à nombres entiers proposés sont évaluées sur la base de la

méthode exacte de séparation et d'évaluation intégrée sur le solveur CPLEX et des analyses utilisant le logiciel MATLAB.

3.2. Exemple illustratif

Dans le cadre des problèmes d'ordonnancement des ateliers flowshop, ces derniers partent généralement du principe que la séquence de traitement des tâches pour chaque machine est identique sur toutes les machines. Une séquence de ce type est appelée séquence de permutation. Presque toutes les recherches ont été axées sur le développement des procédures pour obtenir des ordonnancements de permutation.

En effet, dans le cas général impliquant des machines m et des jobs n, le nombre total des solutions réalisables tend à $(n!)^m$. Cependant, la détermination du meilleur ordonnancement de permutation devient elle-même très difficile, à mesure que la taille du problème augmente. De toute évidence, trouver une solution optimale lorsque les changements de séquence sont autorisés est plus complexe. La figure 3.1 et la figure 3.2 illustrent les solutions optimales de la permutation et de la non-permutation de l'atelier flow shop avec 3 jobs et 4 machines dont les données sont fournies dans le tableau 3.1.

Tableau 3.1 : Données relatives à un atelier flowshop à 3 jobs et 4 machines

Jobs	M_1	M_2	M_3	M_4
1	**1**	**1**	**3**	**2**
2	**1**	**4**	**3**	**3**
3	**4**	**1**	**1**	**3**

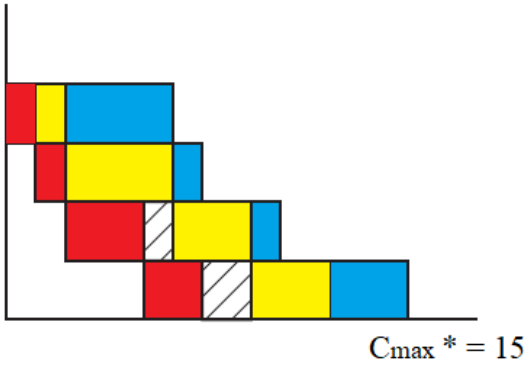

Figure 3.1: Diagramme de Gantt illustrant la solution optimale de « Permutation Flow Shop»

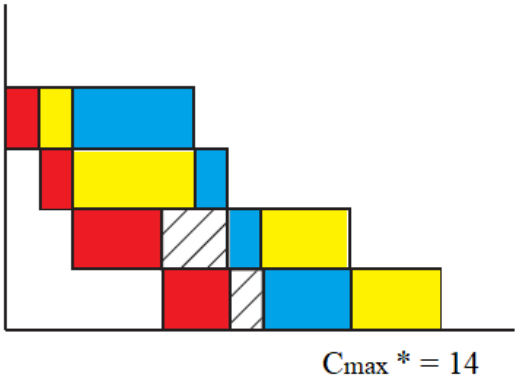

Figure 3.2: Diagramme de Gantt illustrant la solution optimale de « Non-Permutation Flow Shop»

De nombreux auteurs ont souligné l'intérêt de prendre en compte l'ordonnancement de non-permutation dans les ateliers flow shop pratiques [PUG, 2003], [SWA, 2007]. Plus précisément, [POT, 1991] présentent une série d'instances pour lesquelles le programme de permutation optimal est moins performant que le programme de non-permutation optimal d'un facteur supérieur à $(1/2)$ $(\sqrt{m+1/2})$. À noter que cela constitue un écart non négligeable, puisqu'il peut atteindre 50 % pour une instance d'atelier flow shop à 4 machines.

De plus, Sviridenko [SVI, 2004] a proposé un nouvel algorithme d'approximation qui fournit un ordonnancement de permutation avec makepan au maximum $O(\sqrt{m \log m})$ fois l'ordonnancement optimal de non-permutation.

3.3. Formulation mathématique mono-objectif : Problème flowshop à deux machines

Cette section est consacrée à la résolution du problème de l'ordonnancement intégré de la production et la maintenance afin de minimiser la consommation totale d'énergie. Un modèle linéaire d'optimisation à nombres entiers mixtes permettant d'intégrer la stratégie DSS dans l'ordonnancement économe en énergie a été proposé Les indices, paramètres et variables utilisés dans cette formulation sont donnés dans le tableau 3.2.

Tableau 3.2 : Notations utilisées pour formuler le problème flow shop à deux machines

Indices :	
i , i'	Indice des jobs.
$j = 1, 2$	Indice des machines.
s	Indice des vitesses de traitement.
Paramètres :	
n	Nombre de tâches.
V_s	Facteur de vitesse de traitement; $s = 1 , 2, 3$ respectivement pour les vitesses rapide, normale et lente.
$St_{i,i',j}$	Temps de réglage dépendant de la séquence pour passer du job i au job i' sur la machine j, (pour $i = i' . St_{i,i,j}$ indique le temps de réglage pour le job i s'il s'agit du premier job de la séquence).
PM_j	Temps requis pour effectuer la maintenance préventive (PM) sur la machine j.
α_s	Facteur de conversion pour la vitesse de traitement s.
β_j	Facteur de conversion pour le temps d'inactivité de la machine j.
P_j	Puissance de la machine j.
P_0	L'énergie commune, qui est consommée par les équipements et installations auxiliaires.
M	Un très grand nombre (fixé à 1 000 000).
Variables de décisions :	
F_i	$\begin{cases} 1 & \text{si le job i est le premier job,} \\ 0 & \text{Sinon} \end{cases}$
$x_{i,i'}$	$\begin{cases} 1 & \text{si le job i est prévu juste avant le job i' où i} \neq \text{i'} \\ 0 & \text{Sinon} \end{cases}$
$Y_{i,j,s}$	$\begin{cases} 1 & \text{si le job i est traité à la vitesse de la machine j} \\ 0 & \text{Sinon} \end{cases}$
$W_{i,j}$	$\begin{cases} 1 & \text{si la MP est exécutée avant le ième job sur la machine } j \\ 0 & \text{Sinon} \end{cases}$
$C_{i,j}$	Temps d'achèvement de la tâche i sur la machine j
O_i	Configuration de la mise en marche pour le job i sur la deuxième machine (dans le cas où i est le premier job de la séquence)
IT_j	Durée d'inactivité de la machine j
C_{max}	Le makepan, le temps d'achèvement de la dernière tâche sur la dernière machine
$a_{i,j}$	L'âge de la machine après la tâche i sur la machine j
$b_{i,j}$	L'âge de la machine avant la tâche i sur la machine j

Notre objectif est de remédier à un problème de permutation entre deux machines flowshop. En effet, les périodes de maintenance dépendent de la séquence et les machines ont une vitesse variable. En se basant

sur les recommandations faites par [IBR, 2014], un modèle représentatif de la réalité est construit avec des hypothèses et des approximations raisonnables.

Un ensemble de n tâches est censé être traité sur deux machines de manière séquentielle avec un temps fixe, non négatif, pour toutes les tâches. Les hypothèses simplificatrices de ce problème sont:

- Chaque machine ne peut traiter qu'un seul job i.
- Chaque tâche i ne peut être traitée que par une seule machine j à la fois.
- Tous les jobs sont disponibles au début de l'horizon d'ordonnancement.
- Les séquences des tâches dans les différentes machines sont identiques, c'est-à-dire que l'atelier flow shop de permutation est considéré dans le cas présent.

3.3.1. Fonction mono-objectif : Cas du modèle flowshop à deux machines

Cette fonction objectif permet de minimiser la consommation totale d'énergie (TEC) ce qui inclut en premier lieu la consommation d'énergie des machines-outils et les dépenses énergétiques usuelles des installations (CEC). En ce qui concerne la consommation énergétique des machines-outils, une distinction peut être établie entre la consommation d'énergie de traitement (PEC) et la consommation d'énergie en veille (IEC) [LIN, 2015], [ZHA, 2017], [MEN, 2018], calculée comme suit, avec :

$$TEC = PEC + IEC + CEC \quad (3.1.1)$$

3.3.1.1. Consommation d'énergie des processus (PEC)

La consommation d'énergie de traitement des tâches dans le cadre de la production peut être calculée comme suit, avec :

$$PEC = \sum_{i=1}^{n} \sum_{j=1}^{2} \sum_{s=1}^{S} \frac{P_j \cdot T_{i,j} \cdot \alpha_s}{60 \cdot V_s} \quad (3.1.2)$$

3.3.1.2. Consommation d'énergie en mode veille (IEC)

Cette consommation d'énergie en mode veille, au repos ou à vide peut être calculée comme suit,

$$IEC = \sum_{j=1}^{2} \frac{P_j \cdot \beta_j}{60} \cdot IT_j \quad (3.1.3)$$

3.3.1.3. Consommation d'énergie commune (CEC)

La consommation d'énergie collective de tous les appareils électriques et de chauffage peut être calculée en utilisant l'équation suivante (4),

$$CEC = P_0 \cdot C_{max} \quad (3.1.4)$$

3.3.1.4. Consommation totale d'énergie (TEC)

Dans ce contexte, la fonction objectif correspond à la minimisation la consommation totale d'énergie (TEC), estimée comme suit :

$$\text{Fct Obj} = TEC \quad (3.1.5)$$

$$\text{Fct Obj} = PEC + IEC + CEC \quad (3.1.6)$$

$$\text{Fct Obj} = \sum_{i=1}^{n} \sum_{j=1}^{2} \sum_{s=1}^{S} \frac{P_j \cdot T_{I,j} \cdot \alpha_s}{60 \cdot V_s} + \sum_{j=1}^{2} \frac{P_j \cdot \beta_j}{60} \cdot IT_j + P_0 \cdot C_{max} \quad (3.1.7)$$

3.3.2. Modélisation du problème flowshop à deux machines : $F2|prmu - CIV|_{TEC}$

Dans le cadre de cette approche, le modèle MILP (Mixed Integer Linear Programming) est établi comme suit :

Minimiser Fct Obj (3.1.8)

Sous les contraintes suivantes :

$$M(1 - F_i) + O_i \geq St_{i,i,2} - C_{i,1} \quad ; i = 1, 2, \dots, n \tag{3.1.9}$$

$$C_{i,1} \geq \frac{T_{i,1}}{V_s} . Y_{i,1,s} + St_{i,i,2} . F_i + PM_1 . W_{i,1} \; ; i = 1, 2, \dots, n, \; s = 1, 2, 3 \tag{3.1.10}$$

$$C_{i,2} \geq C_{i,1} + O_i + \frac{T_{i,2}}{V_s} . Y_{i,2,s} + PM_2 . W_{i,2}; \; i = 1, 2, \dots, n, \; s = 1, 2, 3 \tag{3.1.11}$$

$$M . F_{i'} + M(1 - x_{i,i'}) + C_{i',j} \geq C_{i,j} + \frac{T_{i',j}}{V_s} . Y_{i',j,s} + St_{i,i',j} . x_{i,i'} + PM_j . W_{i,j}$$
$$; i, i' = 1, 2, \dots, n, s = 1, 2, 3, j = 1,2 \mid i \neq i' \tag{3.1.12}$$

$$b_{1,j} = 0 , \; W_{1,j} = 0 \quad ; j = 1, 2 \tag{3.1.13}$$

$$a_{i,j} = b_{i,j} + \sum_{i=1}^{n} \sum_{s=1}^{S} \frac{T_{i,j}}{V_s} . Y_{i,j,s} \quad ; i = 1, 2, \dots, n , j = 1, 2 \tag{3.1.14}$$

$$b_{i+1,j} = a_{i,j} (1 - W_{i+1,j}) \quad ; i = 2, 3, \dots, n , j = 1, 2 \tag{3.1.15}$$

$$C_{max} \geq C_{i,2} \quad ; i = 1, 2, \dots, n \tag{3.1.16}$$

$$\sum_{i=1}^{n} F_i = 1 \tag{3.1.17}$$

$$\sum_{s=1}^{S} Y_{i,j,s} = 1 \quad ; i = 1, 2, \dots, n, j = 1,2 \tag{3.1.18}$$

$$\sum_{i'=1}^{n} x_{i,i'} = 1 \quad ; i = 1, 2, \dots, n \mid i \neq i' \tag{3.1.19}$$

$$\sum_{i=1}^{n} x_{i,i'} = 1 \quad ; i' = 1, 2, \dots, n \mid i \neq i' \tag{3.1.20}$$

$$IT_j = C_{max} - (\sum_{i=1}^{n} \sum_{s=1}^{S} \frac{T_{i,j}}{V_s} . Y_{i,j,s} + \sum_{i=1}^{n} PM_j . W_{i,j}) ; j = 1,2 \tag{3.1.21}$$

$$PEC = \sum_{i=1}^{n} \sum_{j=1}^{2} \sum_{s=1}^{S} \frac{P_j . T_{i,j} . \alpha_s}{60 . V_s} \tag{3.1.22}$$

$$IEC = \sum_{j=1}^{2} \frac{P_j . \beta_j}{60} . IT_j \tag{3.1.23}$$

$$CEC = P_0 . C_{max} \tag{3.1.24}$$

$$TEC = PEC + IEC + CEC \tag{3.1.25}$$

$$\mathrm{TEC} = \sum_{i=1}^{n}\sum_{j=1}^{2}\sum_{s=1}^{S}\frac{\mathrm{P}_j \cdot \mathrm{T}_{\mathrm{i,j}} \cdot \alpha_s}{60 \cdot V_s} + \sum_{j=1}^{2}\frac{\mathrm{P}_j \cdot \beta_j}{60} \cdot \mathrm{IT}_{\mathrm{j}} + \mathrm{P}_0 \cdot C_{max} \quad (3.1.26)$$

$$\mathrm{C}_{\mathrm{i,j}} \geq 0,\ \mathrm{O}_i \geq 0,\ \mathrm{IT}_{\mathrm{j}} \geq 0,\ \mathrm{TEC} \geq 0; \mathrm{i} = 1, 2, \dots, \mathrm{n}, \mathrm{j} = 1 \quad (3.1.27)$$

$$\mathrm{F}_{\mathrm{i}}, \mathrm{x}_{\mathrm{i,i}},\ \mathrm{Y}_{\mathrm{i,j,s}}, \mathrm{W}_{\mathrm{i,j}} \in \{0,1\};\ \mathrm{i}, \mathrm{i}' = 1, 2, \dots, \mathrm{n}, \mathrm{s} = 1, 2, 3, \mathrm{j} = 1, 2 \mid \mathrm{i} \neq \mathrm{i}' \quad (3.1.28)$$

La contrainte (3.1.9) consiste à calculer la durée de l'intervalle d'ajustement pour le premier job afin de déterminer si le temps d'achèvement sur la deuxième machine est retardé. La contrainte (3.1.10) précise le temps nécessaire pour effectuer la première tâche sur la première machine. La contrainte (3.1.11) garantissant que le temps d'exécution du job sur la deuxième machine est égal ou supérieur au temps d'exécution sur la première machine plus leur temps de traitement sur la deuxième machine ainsi que la maintenance préventive PM_{j} quand existe du i ème job (le temps PM possible). Les contraintes (3.1.11) et (3.1.12) déterminent le temps d'exécution d'un job sur la deuxième machine comme étant son temps de traitement sur la deuxième machine plus le maximum de son temps d'exécution sur la première machine, le temps de réglage pour basculer du job précédent sur la deuxième machine et la maintenance préventive PM_{j} au cas où il existe du $\mathrm{i}^{\mathrm{ème}}$ job (le temps PM possible). Contrainte (3.1.13) précise l'état initial du système. Les contraintes (3.1.14) et (3.1.15) précisent l'âge des machines avant et après chaque tâche i, respectivement. Cmax est calculé dans la contrainte (3.1. 16) comme le temps d'achèvement de la dernière tâche sur la deuxième machine. La contrainte (3.1. 17) garantit la présence de la seule tâche. La contrainte (3.1.18) garantit qu'un seul facteur de vitesse est sélectionné pour chaque tâche. La faisabilité de la séquence est maintenue par les contraintes (3.1.19) et (3.1.20) qui produisent une séquence des tâches. Les temps d'inactivité des machines sont calculés par la contrainte (3.1.21). Les contraintes (3.1.22) - (3.1.25) et (3.1.26) établissent respectivement la consommation totale d'énergie de traitement, la consommation d'énergie au repos et la consommation d'énergie commune, tandis que la contrainte (3.1. 25) est la consommation totale d'énergie. Quant à la contrainte (3.1. 26), elle calcule la TEC en kilowattheures. Finalement, les contraintes (3.1.27) et (3.1. 28) sont des contraintes binaires et de non-négativité pour les variables de décision.

3.3.3. Résolution du problème : $\mathbf{F2|prmu - CIV|_{TEC}}$

3.3.3.1. Essais et résultats de calcul

Cette section est consacrée à la résolution et l'analyse du modèle linéaire proposé correspondant au système étudié. Le modèle mathématique proposé est linéaire pour lequel une résolution exacte par une méthode de séparation et d'évaluation intégrée dans le solveur commercial CPLEX de la programmation linéaire est nécessaire pour qualifier la complexité et l'optimalité du problème considéré.

Dans cette approche, le facteur de vitesse de traitement choisit $\mathrm{V}_{\mathrm{s}} = \{1.2, 1, 0.8\}$ pour le traitement à des vitesses rapides, normales et lentes, respectivement.

Le facteur de conversion, que nous avons utilisé pour calculer l'énergie consommée pendant l'opération, est $\alpha_{\mathrm{s}} = \{1.5, 1, 0.6\}$ pour les vitesses de traitement rapide, normale et lente, respectivement.

Afin d'évaluer la puissance de calcul du modèle proposé, il est nécessaire d'examiner le problème dans ses cas les plus difficiles. En effet, 36 cas différents pour chaque dimension fixe de n tâches et deux machines ont été générés.

Dans tous les cas, les puissances de traitement P sont dérivées de la distribution uniforme $[20, 60]$ avec le même facteur de conversion pour les temps inactifs ($\beta_1 = \beta_2 = 0.05$).

Les temps de traitement à vitesse normale et les temps de réglage pour chaque tâche sur chaque machine sont donnés dans le tableau 3.3. La puissance commune P_0 est fixée à 80. Le temps de maintenance préventive de la machine PM est généré aléatoirement à partir du jeu $\{9, 12, 15\}$.

Le tableau 3.3 indique les temps de calcul moyens obtenus de l'unité de traitement en secondes à l'aide du logiciel CPLEX 12.6 pour trouver la consommation d'énergie totale optimale pour le problème de planification intégrée dans les tâches de production et de maintenance préventive. Afin de mieux comprendre la capacité du modèle ci-dessus, des études comparatives des temps de calcul moyens entre les petits et les grands problèmes sont effectuées comme indiqué dans le tableau 3.3.

Le modèle proposé est résolu en utilisant IBM ILOG CPLEX12.6 et le langage OPL. Les 54 cas sont résolus sur un ordinateur portable HP 4300U avec un processeur Intel Core i5 Duo cadencé à 2,50 GHz et 8 Go de mémoire RAM.

Tableau 3.3 : Récapitulatif des résultats des calculs

Machine * Jobs		PM	T	St	P_0	P	C_{max}	TEC	Time(s)
2 × 3	Inst. 1	5	[1,15[	[1,10[	80	[20,40[	22,5	1869,1	00,13
	Inst. 2	9	[15,20[	[10,15[	80	[40,50[	40,8	3481,3	00,16
	Inst. 3	12	[20,25]	[15,20]	80	[50,60]	62,5	5417,5	00,18
2 × 5	Inst. 1	5	[1,15[	[5,10[	80	[20,40[	36,6	3038	00,14
	Inst. 2	9	[15,20[	[10,15[	80	[40,50[	68,33	5825,8	00,16
	Inst. 3	12	[20,25]	[15,20]	80	[50,60]	104,1	9030,1	00,19
2 × 7	Inst. 1	5	[1,15[	[5,10[	80	[20,40[	50,83	4208,3	00,17
	Inst. 2	9	[15,20[	[10,15[	80	[40,50[	95,83	8170,4	00,20
	Inst. 3	12	[20,25]	[15,20]	80	[50,60]	145,83	12643	00,21
2 × 10	Inst. 1	5	[1,15[	[5,10[	80	[20,40[	72,5	5998,9	00,18
	Inst. 2	9	[15,20[	[10,15[	80	[40,50[	137,5	11721	00,19
	Inst. 3	12	[20,25]	[15,20]	80	[50,60]	208,33	18057	00,23
2 × 15	Inst. 1	5	[1,15[	[5,10[	80	[20,40[	108,33	8959	00,23
	Inst. 2	9	[15,20[	[10,15[	80	[40,50[	206,67	17616	00,27
	Inst. 3	12	[20,25]	[15,20]	80	[50,60]	312,5	27084	00,29
2 × 20	Inst. 1	5	[1,15[	[5,10[	80	[20,40[	144,17	11919	00,36
	Inst. 2	9	[15,20[	[10,15[	80	[40,50[	275,83	23511	00,49
	Inst. 3	12	[20,25]	[15,20]	80	[50,60]	416,67	36111	00,51
2 × 40	Inst. 1	5	[1,15[	[5,10[	80	[20,40[	288,33	23838	02,50
	Inst. 2	9	[15,20[	[10,15[	80	[40,50[	551,67	47022	02,52
	Inst. 3	12	[20,25]	[15,20]	80	[50,60]	833,33	72218	03,61

Machine * Jobs		PM	T	St	P_0	P	C_{max}	TEC	Time(s)
2 × 50	Inst. 1	5	[1,15[	[5,10[	80	[20,40[	360,83	29837	06, 65
	Inst. 2	9	[15,20[	[10,15[	80	[40,50[	689,17	58744	08,77
	Inst. 3	12	[20,25]	[15,20]	80	[50,60]	1041,7	90280	10, 88
2 × 80	Inst. 1	5	[1,15[	[5,10[	80	[20,40[	577,5	47755	27,96
	Inst. 2	9	[15,20[	[10,15[	80	[40,50[	1102,5	93976	29,76
	Inst. 3	12	[20,25]	[15,20]	80	[50,60]	1666,7	144363,7	50,16
2 × 100	Inst. 1	5	[1,15[	[5,10[	80	[20,40[	721,67	59675	1204,17
	Inst. 2	9	[15,20[	[10,15[	80	[40,50[	1378,3	117484,13	1846,26
	Inst. 3	12	[20,25]	[15,20]	80	[50,60]	2083,3	180557,5	1945,54
2 × 200	Inst. 1	5	[1,15[	[5,10[	80	[20,40[	1443,3	121068,8	2004,97
	Inst. 2	9	[15,20[	[10,15[	80	[40,50[	2756,7	234976,2	2009,17
	Inst. 3	12	[20,25]	[15,20]	80	[50,60]	4166,7	361123,1	2343,22
2 × 400	Inst. 1	5	[1,15[	[5,10[	80	[20,40[			2143,17
	Inst. 2	9	[15,20[	[10,15[	80	[40,50[		—	3233,05
	Inst. 3	12	[20,25]	[15,20]	80	[50,60]			3476,44

3.3.3.2. Analyse des résultats

Pour mieux illustrer l'impact du TEC sur le Cmax, et comme indiqué dans la figure 3.3, une étude comparative de l'évolution de la consommation totale d'énergie et de makespan en fonction des temps d'exécution moyens est établie pour les problèmes de petite taille. En outre, comme les valeurs de TEC sont beaucoup plus importantes que les valeurs de Cmax, une meilleure illustration des valeurs de Cmax est présentée dans la figure 3.4.

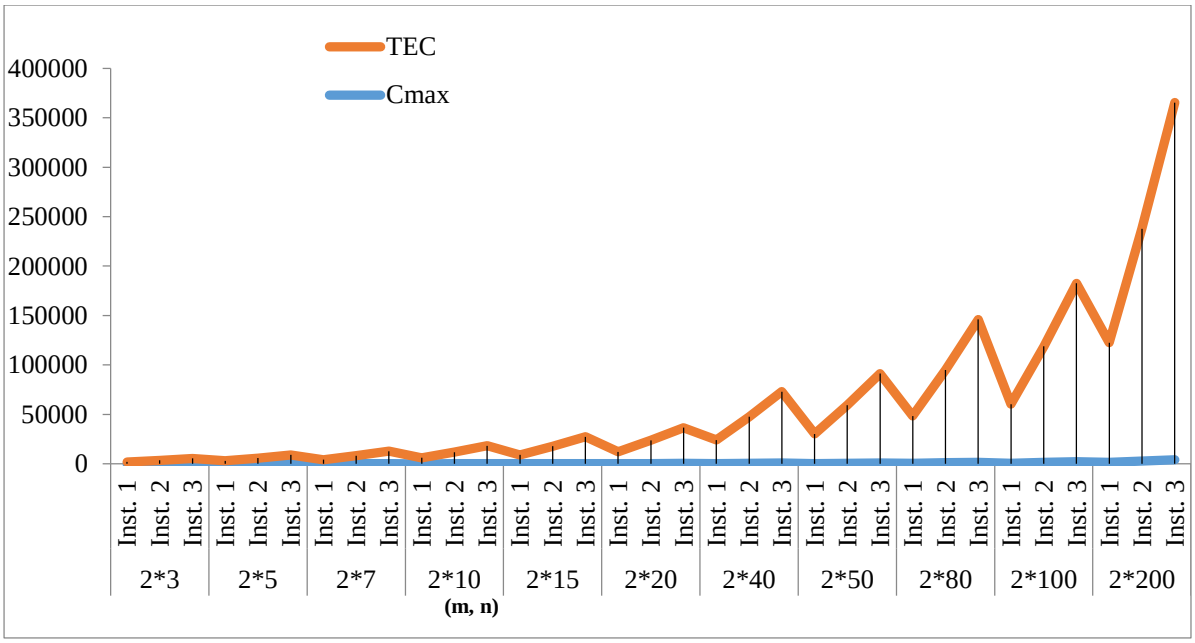

Figure 3.3 : Évolution de la consommation totale d'énergie et du Makespan selon les instances

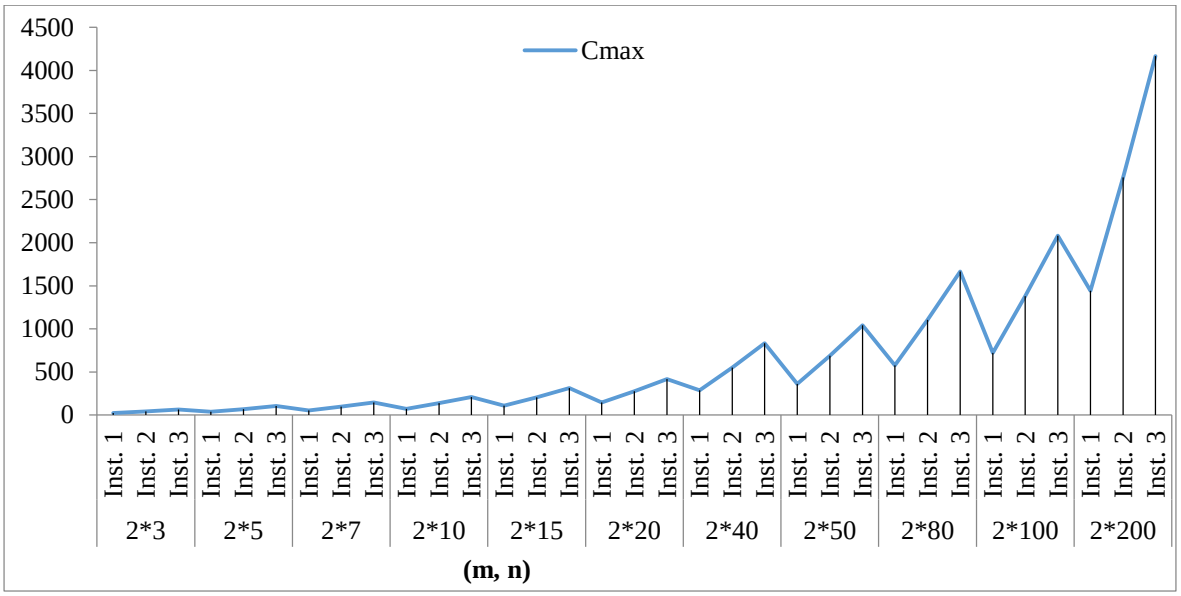

Figure 3.4: Évolution du Makespan selon les instances

Dans la figure 3.3, il est évident que si deux machines sont traitées en même temps et que le nombre de tâches varie, une variation considérable du TEC est observée. En outre, si en prenant le cas de la 3ème instance pour les ateliers (2×3), (2×5), (2×7), (2×10), (2×15) et (2×200), la consommation d'énergie varie respectivement de (5417,5, 9030,1, 12643, 18057, 27084 et 361123,1). Le nombre des tâches traitées dans les machines a une influence sur la valeur optimale de la consommation d'énergie. En ce qui concerne le makespan, les valeurs fournies dans le tableau 3.2, la figure 3.3 et la figure 3.4 indiquent que le fait d'augmenter la date d'achèvement final de toutes les tâches engendre une augmentation significative de la consommation d'énergie. Dans le troisième cas des problèmes (2×3), (2×5), (2×7), (2×7), (2×10), (2×15) et (2×200), le délai d'achèvement de toutes les tâches Cmax est égal à (62,5, 104,1 ; 145,83 ; 208,33 ; 312,5 et 4166,7) et la consommation d'énergie qui en résulte est de (5417,5, 9030,1 ; 12643 ; 18057 ; 27084 et 361123,1) respectivement. Conformément aux deux figures, la conclusion est identique pour les problèmes de petite et de grande taille, les écarts de consommation d'énergie dépend du type d'atelier étudié et du nombre de tâches effectuées. En revanche, il est évident que le makespan est en hausse avec l'augmentation du nombre des tâches, mais sa valeur reste presque négligeable par rapport à la consommation totale d'énergie.

3.4. Formulation mathématique mono-objectif : Problème flowshop à plusieurs machines

Cette section est consacrée à la problématique de déploiement de la stratégie Dynamic Speed Scaling (DSS) dans l'ordonnancement intégré des tâches de la production et de la maintenance de durée fixe et flexible visant à minimiser la consommation totale d'énergie (TEC).

Des modèles de programmation mixtes binaires à nombres entiers sont fournis pour obtenir des ordonnancements optimaux. Des contraintes sont intégrées pour minimiser la consommation totale d'énergie dans l'atelier flow shop basé sur le modèle existant de [WEI, 2016] et [SAD, 2019a].

Les modèles ont été adaptés pour tenir compte des différentes contraintes de la consommation totale d'énergie de traitement des opérations et de la consommation d'énergie commune des installations auxiliaires dans l'atelier flow shop mentionné précédemment. Les indices, paramètres et variables utilisés dans cette formulation sont donnés dans le tableau 3.4.

Tableau 3.4 : Notations utilisées pour formuler les problèmes flowshop à plusieurs machines

Indices :	
i	Indice des tâches.
j	Indice des machines.
k, k'	Indices de la position dans chaque machine.
l	Indice du lot dans chaque machine.
s	Indice du niveau de vitesse.
Ensembles :	
J	Ensemble des tâches; $J = \{J_1, J_2, \dots, J_n\}$.
M	Ensemble des machines; $M = \{M_1, M_2, \dots, M_m\}$.
O_i	Ensemble des opérations de J_i; $O_i = \{O_{i,1}, O_{i,2}, \dots, O_{i,m}\}$.
$BH_{l,j}$	Ensemble des lots dans le $lème$ lot de la machine M_j.
Paramètres :	
n	Nombre des tâches.
m	Nombre des machines.
S	Nombre du niveau de vitesse.
$w_{i,j}$	Charge de travail requise de job i $(1 \leq i \leq n)$dans la machine $j(1 \leq j \leq m)$.
V_s	Vitesse du traitement d'une machine fonctionnant à un niveau de vitesse s.
$P_{i,j}$	La puissance de traitement de chaque opération $O_{i,j}$ dans la machine j.
TBF_j	La période entre deux intervalles de non-disponibilité consécutifs dans M_j.
PM_j	Le temps de maintenance de la machine M_j.
Z	un entier infini.
C_{max}	Le makespan, qui correspond au temps d'exécution maximal de toutes les tâches.
P_0	La puissance commune, consommée par les équipements auxiliaires et les installations.
P E C	La consommation totale d'énergie du traitement $O_{i,j}$.
C E C	La consommation d'énergie commune des installations auxiliaires dans l'atelier.
T E C	La consommation totale d'énergie dans l'atelier "flow shop".
Variables de décision :	
$x_{i,j,k,s}$	$\begin{cases}1 \text{ si la tâche } J_i \text{ est traité à la kéme position dans } M_j \text{ au niveau de vitesse s.}\\0 \text{ Sinon}\end{cases}$
$g_{k,j}$	$\begin{cases}1 \text{ si l'opération } O_{k,j} \text{ est la dernière opération d'un lot réel,}\\0 \text{ Sinon}\end{cases}$
$y_{k,j}$	$\begin{cases}1 \text{ si PM est effectuée immédiatement avant la kème tâche dans la machine j}\\0 \text{ sinon}\end{cases}$

Variables auxiliaires :	
$J_{k,j}$	La kème tâche dans la machine M_j.
$O_{k,j}$	L'opération de la tâche $J_{k,j}$.
$T_{k,j}$	Le temps de traitement de $O_{k,j}$.
$S_{k,j}$	L'heure de début de $O_{k,j}$.
$C_{k,j}$	L'heure de fin de $O_{k,j}$.
$e_{k,j}$	Temps écoulé de $O_{k,j}$, qui correspond au temps écoulé entre l'heure de fin de $O_{k,j}$ et l'heure de fin du dernier intervalle de non-disponibilité .
$q_{k,j}$	Nombre des lots vides compris entre $O_{k,j}$ et $O_{k-1,j}$. $q_{1,j}$ est le nombre des lots vides compris entre $O_{1,j}$ et le temps zéro.
$P_{i,j,s}$	Taux de consommation d'énergie pour le traitement de job i sur la machine j au niveau de vitesse s.
$T_{i,j,s}$	Le temps de traitement réel de la tache i sur la machine *j* au niveau de vitesse *s*.
$a_{k,j}$	L'âge de la machine après l'opération $O_{k,j}$ dans la machine M_j.
$b_{k,j}$	L'âge de la machine avant l'opération $O_{k,j}$ dans la machine M_j.

Un ensemble des tâches J doit être exécuté sur un ensemble des machines M au niveau de vitesse s. Chaque tâche J_i ($J_i \in J$) consiste en une séquence de m opérations $\{O_{i1}, O_{i2},\ldots, O_{im}\}$ et nécessite une charge de travail requise de traitement des jobs $w_{i,j}$, la durée de la période de la maintenance préventive TBF_j, le temps de maintenance PM_j.

- Toutes les tâches sont disponibles au début de l'horizon d'ordonnancement.
- Les séquences des tâches optimales ne sont pas nécessairement identiques lorsque la contrainte d'indisponibilité est prise en compte, même pour les ateliers flow shop à deux machines. Ainsi, l'ordonnancement de non-permutation est considéré dans cette étude.
- Les machines peuvent traiter des taches à différents niveaux de vitesse, qui sont sélectionnés à partir d'un ensemble de niveaux S.
- Soit v_S ($1 \leq s \leq S$) represent la vitesse de traitement d'une machine fonctionnant au niveau de vitesse s.
- Notez que dans cet article, nous supposons que toutes les machines partagent la même vitesse de traitement au niveau s. Sans perte de généralité, supposons que $v_1 < v_2 < \ldots < v_S$.
- La charge de travail requise pour la tache i ($1 \leq i \leq n$) dans la machine j ($1 \leq j \leq m$) , indiquée par $w_{i,j}$ dépend à la fois de la tache lui-même et de la machine sur laquelle elle est traitée.
- Le temps de traitement réel de la tache i sur la machine j au niveau de vitesse s, dénoté par $T_{i,j,s}$, peut être calculé par $T_{i,j,s} = \frac{w_{i,j}}{v_s}$.
- Soit $P_{i,j,s}$ représente le taux de consommation d'énergie pour le traitement de la tache i dans la machine j au niveau de vitesse s. Ensuite, la consommation d'énergie réelle requise pour le traitement de la tache i dans la machine j au niveau de vitesse s, peut être obtenue en multipliant le temps de traitement réel et le taux de consommation d'énergie correspondant. C'est-à-dire, $P_{i,j,s} \times \frac{w_{i,j}}{v_s}$.

- Nous supposons que si $v_x > v_y \quad (x, y \in \{1, \dots, S\})$, alors $P_{i,j,x} \times \frac{w_{i,j}}{V_x} > P_{i,j,y} \times \frac{w_{i,j}}{V_y}$ pour n'importe quelle paire de $i \in \{1, \dots, n\}$ et $j \in \{1, \dots, m\}$. Cela suggère qu'une vitesse de traitement plus élevée entraînera moins de temps de traitement mais plus de consommation d'énergie.
- Le problème réside dans l'affectation des tâches à traiter aux machines et dans le choix d'une vitesse de traitement appropriée pour chaque tâche afin de minimiser la consommation totale d'énergie.
- Suppose que $TBF_j \geq (T_{i,j,s} = \frac{w_{i,j}}{V_s})$ pour toutes les tâches, sinon il n'y a tout simplement pas de temps réalisable.
- Aucune préemption des opérations n'est autorisée (c'est-à-dire les cas non susceptibles de reprise).
- L'ordonnancement π peut-être noté comme $\pi = \{\pi_1, \pi_2, \dots, \pi_m\}$, ou π_j représente la séquence des tâches dans M_j.
- Un lot indique l'ensemble des tâches de la même période de tâche, puis π_j peut être représenté comme $\pi_j = \{BH_{1,j}, PM_{1,j}, BH_{2,j} \dots, PM_{l-1,j}, BH_{l,j}, \dots\}$, ou $BH_{l,j}$ est le lth lot dans π_j.
- Soit $Q_{l,j}$ est le temps total de traitement des tâches dans $BH_{l,j}$.
- Soit $J(BH_{l,j})$ être la dernière tâche dans $BH_{l,j}$.
- Soit $G_{l,j}$ être le temps d'inactivité entre l'heure de fin de $J(BH_{l,j})$ et l'heure de début de la prochaine maintenance.
- S'elle n'y a pas de tâche dans $BH_{l,j}$, le lot est appelé «lot vide»; sinon, il s'agit d'un «lot réel» .

3.4.1. Fonction mono-objectif : Cas du modèle flowshop à plusieures machines

La fonction objectif minimise la consommation totale d'énergie (T E C) de l'atelier flow shop calculée comme suit:

$$T\,E\,C = P\,E\,C + C\,E\,C \tag{3.2.1}$$

3.4.1.1. Consommation d'énergie de traitement (PEC)

S'agissant de l'énergie consommée par les machines lors du traitement des opérations, la consommation en énergie de traitement peut être calculée comme suit,

$$P\,E\,C = \sum_{i=1}^{n} \sum_{j=1}^{m} \sum_{k=1}^{n} \sum_{s=1}^{S} P_{i,j,s} \cdot \frac{w_{i,j}}{V_s} \cdot x_{i,j,k,s} \tag{3.2.2}$$

3.4.1.2. Consommation d'énergie commune (CEC)

Afin de préserver l'environnement de l'atelier (température et humidité, par exemple), des installations auxiliaires telles que l'éclairage, la climatisation, la ventilation et le chauffage doivent être utilisées. La consommation d'énergie de ces installations auxiliaires correspond à la consommation d'énergie commune, qui peut être calculée à l'aide de l'équation suivante (3.2.3).

$$C\,E\,C = P_0 \cdot C_{max} \tag{3.2.3}$$

3.4.1.3. Consommation totale d'énergie (TEC)

La consommation totale d'énergie (TEC) est la somme de la consommation totale d'énergie de traitement et de la consommation d'énergie commune calculée comme suit:

$$T\,E\,C = \sum_{i=1}^{n} \sum_{j=1}^{m} \sum_{k=1}^{n} \sum_{s=1}^{S} P_{i,j,s} \cdot \frac{w_{i,j}}{V_s} \cdot x_{i,j,k,s} + P_0 \cdot C_{max} \tag{3.2.4}$$

$$\mathrm{T\,E\,C} = \sum_{i=1}^{n}\sum_{j=1}^{\mathrm{m}}\sum_{k=1}^{\mathrm{n}}\sum_{s=1}^{S}\frac{\mathrm{w}_{i,j}\ .\ \mathrm{P_{i,j}}\ .\ {V_s}^{\alpha}}{V_s}\ .\ \mathrm{x_{i,j,k,s}} + \mathrm{P_0}\ .C_{max} \quad (3.2.5)$$

Avec : $\mathrm{P_{i,j,s}} = \mathrm{P_{i,j}}\ .\ {V_s}^{\alpha}$ ($\alpha > 1$) (3.2.6)

La fonction objectif est la minimisation de la consommation totale d'énergie :

Fct Obj = TEC (3.2.7)

Fct Obj = $\mathrm{P\,E\,C} + \mathrm{C\,E\,C}$ (3.2.8)

Fct Obj= $\sum_{i=1}^{n}\sum_{j=1}^{\mathrm{m}}\sum_{k=1}^{\mathrm{n}}\sum_{s=1}^{S}\frac{\mathrm{w}_{i,j}\ .\ \mathrm{P_{i,j,s}}}{V_s}\ .\ \mathrm{x_{i,j,k,s}} + \mathrm{P_0}\ .C_{max}$ (3.2.9)

3.4.2. Modélisation du problème flowshop avec PM fixe : $\mathbf{Fm|nr-FIV|_{TEC}}$

Le premier cas, où les intervalles d'indisponibilité sont fixés périodiquement, est désigné comme suit :

- les intervalles de non-disponibilité ou bien les périodes de la maintenance sont fixées périodiquement, est noté $\mathrm{Fm|nr-FIV|}_{TEC}$.
- Le temps entre deux intervalles de non-disponibilité consécutifs dans $\mathrm{M_j}$ est $\mathrm{TBF_j}$ et le temps de maintenance est $\mathrm{PM_j}$.
- Le $lième$ intervalle de non-disponibilité peut être calculé comme suit: $lième = [\mathrm{l\ TBF_j} + (\mathrm{l}-1)\ \mathrm{PM_j}\ ,\ \mathrm{l\,(TBF_j\ +\ PM_j)}]$.

Le 1ermodèle relatif au problème $\mathbf{Fm|nr-FIV|_{TEC}}$ peut finalement être établi comme suit :

Minimiser Fct Obj = $\sum_{i=1}^{n}\sum_{j=1}^{\mathrm{m}}\sum_{k=1}^{\mathrm{n}}\sum_{s=1}^{S}\frac{\mathrm{w}_{i,j}\ .\ \mathrm{P_{i,j,s}}}{V_s}\ .\ \mathrm{x_{i,j,k,s}} + \mathrm{P_0}\ .C_{max}$ (3.2.10)

Sous les contraintes suivantes :

$\sum_{i=1}^{\mathrm{n}}\mathrm{x_{i,j,k,s}} = 1 \quad ;\forall\ \mathrm{j,k,s}$ (3.2.11)

$\sum_{k=1}^{\mathrm{n}}\mathrm{x_{i,j,k,s}} = 1 \quad ;\forall \mathrm{j,i,s}$ (3.2.12)

Les contraintes (3.2.11) et (3.2.12) garantissent que chaque travail ne peut être placé qu'à une seule position de la séquence de chaque machine, et qu'une seule tâche peut être placée à chaque position, respectivement.

$\sum_{s=1}^{S}\frac{\mathrm{w}_{k,j}}{V_s} = \sum_{i=1}^{\mathrm{n}}\sum_{S=1}^{S}\mathrm{x_{i,j,k,s}}\ .\frac{\mathrm{w}_{i,j}}{V_s} \quad ;\forall\ \mathrm{k}\ ,\ \forall\ \mathrm{j}\ ,\forall\ \mathrm{s}$ (3.2.13)

La contrainte (3.2.13) spécifie le temps de traitement de l'opération $O_{k,j}$.

$\mathrm{C_{k,j}} = \mathrm{S_{k,j}} + \sum_{s=1}^{S}\frac{\mathrm{w}_{k,j}}{V_s} \quad ;\forall\ \mathrm{j} > 1\ ,\ \forall\ \mathrm{k}$ (3.2.14)

La contrainte (3.2.14) établit le lien entre l'heure de début et l'heure de fin de$O_{k,j}$.

$\mathrm{S_{1,1}} = 0$ (3.2.15)

$\mathrm{S_{k,j}} \geq \mathrm{C_{k-1,j}} \quad ;\forall\ \mathrm{j},\ \forall\ \mathrm{k} \geq 2$ (3.2.16)

Les contraintes (3.2.15) et (3.2.16) garantissent que la kème tâche ne peut pas démarrer avant l'heure de fin de la tâche précédente dans M_j.

$(2 - \mathrm{x_{i,j,k,s}} - \mathrm{x_{i,j+1,k',s}})Z \geq \mathrm{S_{k,j}} + \sum_{s=1}^{S}\frac{\mathrm{w}_{i,j}}{V_s} - \mathrm{S_{k',j+1}};\ \forall\ \mathrm{j} < \mathrm{m}\ ,\mathrm{i,k,k',s}$ (3.2.17)

La contrainte (3.2.17) garantit que l'heure de début de la tâche i dans M_{j+1} n'est pas antérieure à son heure de fin dans M_j.

$$C_{k,j} = e_{k,j} + (PM_j + TBF_j)\sum_{k'=1}^{k-1} g_{k',j} + (PM_j + TBF_j)\sum_{k'=1}^{k-1} q_{k',j};\ \forall j,\ \forall k \geq 1 \quad (3.2.18)$$

$$C_{1,j} = e_{1,j} + (PM_j + TBF_j)\, q_{1,j};\ \forall j \quad (3.2.19)$$

Les contraintes (3.2.18) et (3.2.19) représentent que le temps d'arrivée de $O_{k,j}$ est égal à la somme du temps écoulé de $O_{k,j}$ et des temps des lots précédant $O_{k,j}$, y compris les lots réels et les lots vides.

$$q_{k,j} \leq g_{k-1,j}\ Z\ ;\ \forall j,\ \forall k > 1 \quad (3.2.20)$$

La contrainte (3.2.20) garantit qu'aucun lot vide n'existe entre $O_{k-1,j}$ et $O_{k,j}$ lorsque $O_{k-1,j}$ n'est pas la dernière tâche d'un lot réel.

$$e_{k,j} \geq \sum_{s=1}^{S} \frac{w_{k,j}}{V_s}\ ;\ \forall k,\ \forall j \quad (3.2.21)$$

La contrainte (3.2.21) garantit que le temps écoulé de la tâche est supérieur à son temps de traitement.

$$e_{k,j} \leq TBF_j\ ;\ \forall k,\ \forall j \quad (3.2.22)$$

La contrainte (3.2.22) garantit qu'aucune tâche ne peut être traitée pendant les intervalles d'indisponibilité.

$$e_{k+1,j} \geq e_{k,j} + \sum_{s=1}^{S} \frac{w_{k+1,j}}{V_s} - g_{k,j}\ Z;\ \forall k < n,\ \forall j \quad (3.2.23)$$

La contrainte (3.2.23) garantit que le temps écoulé de $O_{k+1,j}$ est supérieur à la somme du temps de traitement de $O_{k+1,j}$ et du temps écoulé de $O_{k,j}$ s'ils sont dans le même lot.

$$C_{max} = C_{n,m} \quad (3.2.24)$$

La contrainte (3.2.24) confirment que le makespan est égal au temps d'achèvement de la nième tâche de la machine.

$$x_{i,j,k,s},\ g_{k,j}\quad sont\ des\ variables\ binaires \quad (3.2.25)$$

La contrainte (3.2.25) définit les restrictions binaires pour $x_{i,j,k,s}$ et $g_{k,j}$ respectivement.

$$q_{k,j}\quad est\ un\ entier \quad (3.2.26)$$

$$\frac{w_{k,j}}{V_s},\ C_{k,j},\ S_{k,j},\ e_{k,j} \geq 0 \quad (3.2.27)$$

3.4.3. Modélisation du problème flowshop avec PM flexible : $\mathbf{Fm|nr-CIV|_{TEC}}$

Le second cas, où le temps de travail continu des machines, sans tenir compte du temps d'inactivité (temps mort), ne peut pas dépasser un temps maximum de TBF_j , est désigné par $\mathbf{Fm|nr-CIV|_{TEC}}$ **.**

De toute évidence, il n'y a pas d'écart entre la dernière tâche d'un lot et la période de la maintenance suivante, c'est-à-dire $G_{l,j} = 0$. Tous les lots de toutes les machines sont des «lots réels». Dans ce modèle, la stratégie PM est basée sur l'exécution plutôt que sur le temps. L'âge de la machine augmente avec les tâches de traitement et ne change pas lorsque la machine est inactive. Après la maintenance, l'âge de la machine devient 0. Les contraintes d'indisponibilité peuvent être représentées par le fait que l'âge de la machine doit être inférieur à TBF_j à tout moment de l'horizon d'ordonnancement. En attendant, le responsable doit déterminer les heures de début des maintenances.

Le 2éme modèle relatif au problème $Fm|nr-CIV|_{TEC}$ peut finalement être établi comme suit :

Minimiser Fct Obj = $\sum_{i=1}^{n}\sum_{j=1}^{m}\sum_{k=1}^{n}\sum_{s=1}^{S}\frac{w_{i,j}\ .\ P_{i,j,s}}{V_s}\ .\ x_{i,j,k,s} + P_0\ .\ C_{max}$ (3.2.10)

Sous les contraintes suivantes:

Les contraintes (3.2.11)-(3.2.15) et la contrainte (3.2.17) sont identiques à ceux du modèle $\boldsymbol{Fm|nr-FIV|_{TEC}}$.

$S_{k,j} \geq C_{k-1,j} + PM_j\ .\ y_{k,j}$; $\forall$ j , $\forall$ k ≥ 2 (3.2.28)

La contrainte (3.2.28) garantit que l'opération $O_{k,j}$ ne doit pas commencer avant la somme de l'heure de fin du job précédent immédiat dans Mj et du temps de maintenance possible.

$b_{1,j} = 0$; $\forall$ j (3.2.29)

$y_{1,j} = 0$; $\forall$ j (3.2.30)

Les contraintes (3.2.29) et (3.2.30) spécifient l'état initial du système.

$a_{k,j} = b_{k,j} + \sum_{s=1}^{S}\frac{w_{k,j}}{V_s}$; $\forall$ k , $\forall$ j (3.2.31)

$b_{k+1,j} = a_{k,j}\ (1 - Y_{k+1,j})$; $\forall$ j , k $\leq$ n (3.2.32)

Les contraintes (3.2.31) et (3.2.32) spécifient l'âge des machines avant et après chaque opération $O_{k,j}$, respectivement.

$a_{k,j} \leq TBF_j$; $\forall$ k , $\forall$ j (3.2.33)

La contrainte (3.2.33) garantit que le temps de travail continu des machines ne sera pas supérieur à TBFj.

$x_{i,j,k,s}$, $y_{k,j}$ sont des variables binaires (3.2.34)

La contrainte (3.2.34) définit les restrictions binaires pour $x_{i,j,k}$ et $y_{k,j}$ respectivement.

$\frac{w_{k,j}}{V_s}$, $C_{k,j}$, $S_{k,j} \geq 0$ (3.2.35)

3.4.4. Résolution des problèmes : $\mathbf{Fm|nr-FI|_{TEC}}$ || $\mathbf{Fm|nr-CI|_{TEC}}$

3.4.4.1. Essais et résultats numérique

Cette section est consacrée à l'analyse exacte et approchée des problèmes étudiés pour analyser les performances des modèles linéaires qui correspond au système étudié. Toutefois, les modèles mathématiques $Fm|nr-FIV|_{TEC}$ et $Fm|nr-CIV|_{TEC}$ représentent une programmation linéaire pour laquelle une résolution exacte par une méthode Branch and Bound intégrée dans le solveur CPLEX commercial de programmation linéaire. Afin d'évaluer la puissance de calcul du modèle proposé, il convient d'examiner le problème dans les cas les plus difficiles ; en effet, 39 instances différentes pour chaque dimension fixée de n jobs et m machines ont été générées.

De surcroit, dans le plan d'expériences adopté pour le problème considéré, la charge de travail requise de traitement des jobs $w_{i,j}$ sont des entiers générés uniformément à partir d'un intervalle [5, 29].

La charge de travail de chaque tache suit une répartition uniforme entre [5, 29]. Pour générer les taux de consommation d'énergie, nous générons d'abord un taux de consommation d'énergie de base pour le travail i ($1 \leq i \leq N$) sur la machine j ($1 \leq j \leq M$), noté par $P_{i,j}$, La puissance de traitement qui est uniformément sélectionné parmi [3,5].

Par conséquent, la consommation d'énergie correspondante du travail i sur la machine j avec vitesse Vs est $Q_{i,j,s} = \frac{w_{i,j} \cdot P_{i,j} \cdot V_s{}^{\alpha}}{V_s} = w_{i,j} \cdot P_{i,j} \cdot V_s{}^{\alpha-1}$. Dans l'équation ci-dessus, puisque $\alpha - 1 > 0$ tient et $w_{i,j} \cdot P_{i,j}$ est constant pour le travail i sur la machine j, elle suit que plus le rapport est rapide, plus le $Q_{i,j,s}$ sera élevé. Dans cet article, nous avons défini $\alpha = 3$. Quant à les niveaux de vitesse de traitement, nous réglons S = 3 et $V_s = \{0{,}75, 1, 1, 1{,}25\}$.

La période de temps TBF_j est générée uniformément à partir d'un intervalle $[\underline{TBF_j}, \overline{TBF_j}]$, là où TBF_j est réglé sur 30 et TBF_j est fixé à la valeur maximale de 30 et la moitié du temps de traitement totale des tâches dans machine j. Le temps de maintenance PM_j est généré uniformément à partir d'un intervalle $\left[\underline{PM_j}, \overline{PM_j}\right] = \left[\frac{TBF_j}{5}, \frac{2 \times TBF_j}{3}\right]$.

Nous supposons pour les problèmes de petite taille que la puissance des installations auxiliaires est égale à $P_0 = 5$; Pour les cas des problèmes de grande taille, cette puissance commune P_0 est paramétrée sur 5 , 15 ou 20. La taille du problème (n, m) est réglée comme dans le tableau 3.5.

Pour chaque combinaison des paramètres, trois instances sont générées d'une manière aléatoire pour les problèmes de grande taille ; ces instances sont basées sur la variation de la puissance commune des installations auxiliaires pour $P_0 = 5$, $P_0 = 15$ et $P_0 = 20$;

Le tableau 3.5 rapporte les temps de calcul moyens obtenus du CPU en secondes en utilisant le logiciel CPLEX 12.6 pour trouver la consommation totale d'énergie optimale des problèmes d'ordonnancement intégré des tâches de la production et de la maintenance préventive. Pour avoir plus de clairvoyance sur la capabilité du modèle précité, des études comparatives des temps de calcul moyens entre les problèmes de petite taille et de grande taille sont effectuées comme illustré sur le tableau 3.5. La TEC (B&B) est la solution optimale ou la limite inférieure trouvée par le CPLEX en 3600 secondes.

Toutes les formulations MILP sont modélisées en utilisant IBM ILOG CPLEX12.6. Les 39 cas sont résolus sur un ordinateur portable HP 4300U équipé d'un processeur Intel Core i5 Duo cadencé à 2,50 GHz et de 8 Go de mémoire RAM. Le temps limite est fixé à 4000 secondes. En d'autres termes, les analyses sont terminées au bout de 3600 secondes. Si aucune solution optimale n'est obtenue dans les 3600 secondes, la meilleure solution actuelle est renvoyée.

Tableau 3.5 : Récapitulatif des résultats de calcul

							$Fm\|nr-FIV\|_{TEC}$			$Fm\|nr-CIV\|_{TEC}$		
(n, m)		**TBF**	**PM**	**W**	**P_0**	**P**	**C_{max}**	**TEC**	**time (s)**	**C_{max}**	TEC	**time (s)**
5	**2**	[30,102]	[6,68]	[5,29]	5	[3,5]	483.2	6487	00,73	453.2	6282	00,63
	3						490.6	8749	02,79	471.7	8547	02,70
	4						493.73	13779	03,47	473.74	13577	03,38
	5						494.78	12893	04,22	474.79	12691	04,13
	6						495.13	16019	05,55	476.14	15999	04,73
6	**2**	[30,117]	[6,78]	**[5**,29]	5	[3,5]	565.8	7855	01,42	535.8	7705	01,29
	3						575.2	10440	04,53	545.2	10240	04,63
	4						578.33	12994	05,93	548.34	12773	05,03
	5						579.38	15737	06,00	549.39	15533	05,70
7	**2**	[30,131]	[6,87]	**[5**,29]	5	[3,5]	650.4	9034	07,88	620.2	9005	06,69
	3						659.8	12072	15,88	639.7	10052	14,68
	4						662.9	15089	11,47	622.5	15049	10,48

							$Fm\|nr-FIV\|_{TEC}$			$Fm\|nr-CIV\|_{TEC}$		
(n, m)	**TBF**	**PM**	W	P_0	P	C_{max}	**TEC**	**time (s)**	C_{max}	TEC	**time (s)**
8 2 3	[30,146]	[6,97]	**[5**,29]	5	[3,5]	735 744.4	10393 13834	12,81 12,65	715 724.4	10193 13333	11,73 11,88
9 2	[30,160]	[6,106]	**[5**,29]	5	[3,5]	819.6	11672	13,89	799.6	10572	12,66
20 15	Sc. 1	[30,320]	[6,213]	[5,29]	10	[3,5]	2068	77982	15,41	2032	77763	14,59
	Sc. 2				15			113138	17,03		103139	16,34
	Sc. 3				20			148294	21,98		143393	19,98
20 20	Sc. 1	[30,320]	[6,213]	**[5**,29]	10	[3,5]	2756.2	103468	50,68	2316	103467	49,88
	Sc. 2				15			151288	52,97		150948	52,01
	Sc. 3				20			195092	53,88		192192	53,12
30 15	Sc. 1	[30,465]	[6,310]	**[5**,29]	10	[3,5]	4851	176439.6	55,22	4453	176219.6	54,34
	Sc. 2				15			258906.6	66,25		252306.6	65,45
	Sc. 3				20			341373	62,88		321373	60,98
30 20	Sc. 1	[30,465]	[6,310]	**[5**,29]	10	[3,5]	5062	183613.6	92,10	5043	121613.6	89,23
	Sc. 2				15			269667.6	96,32		234667.6	94,67
	Sc. 3				20			355721.6	98,44		323721.6	84,67
40 15	Sc. 1	[30,610]	[6,406]	**[5**,29]	10	[3,5]	6011	274897,2	133,25	5878	274675	122,56
	Sc. 2				15			404675,2	145,45		401473	145,78
	Sc. 3				20			534452	166,65		499353	100,88
40 20	Sc. 1	[30,610]	[6,406]	**[5**,29]	10	[3,5]	6321		187,87	6013		187,88
	Sc. 2				15				249,99			227,98
	Sc. 3				20				437,37			414,76
50 15	Sc. 1	[30,755]	[6,503]	**[5**,29]	10	[3,5]	7015	—	1998,46	7002	—	1996,77
	Sc. 2				15				2587,65			2564,89
	Sc. 3				20				2062,92			2032,82
50 20	Sc. 1	[30,755]	[6,503]	**[5**,29]	10	[3,5]	7323		2990,97	7320		2997,96
	Sc. 2				15				3240,36			3143,54
	Sc. 3				20				3533,88			3447,47

Nos modèles MILPs sont capables de trouver la solution optimale en un temps record. Et plus précisément, dans un délai raisonnable. Néanmoins, pour un problème de grande envergure, les modèles MILPs nécessitent un temps relativement excessif.

3.4.5. Analyse des résultats

Par rapport à deux problèmes considérés $\mathbf{Fm|nr-FIV|_{TEC}}$ et $\mathbf{Fm|nr-CIV|_{TEC}}$, les temps moyens de calcul sont relativement raisonnables (moins de 15 secondes) du moment où la taille du problème est inférieure à 9*2 (9 jobs et 2 machines). Dès que la taille est supérieure à 9*2, les temps de calculs deviennent très importants comme illustré dans la figure 3.5.

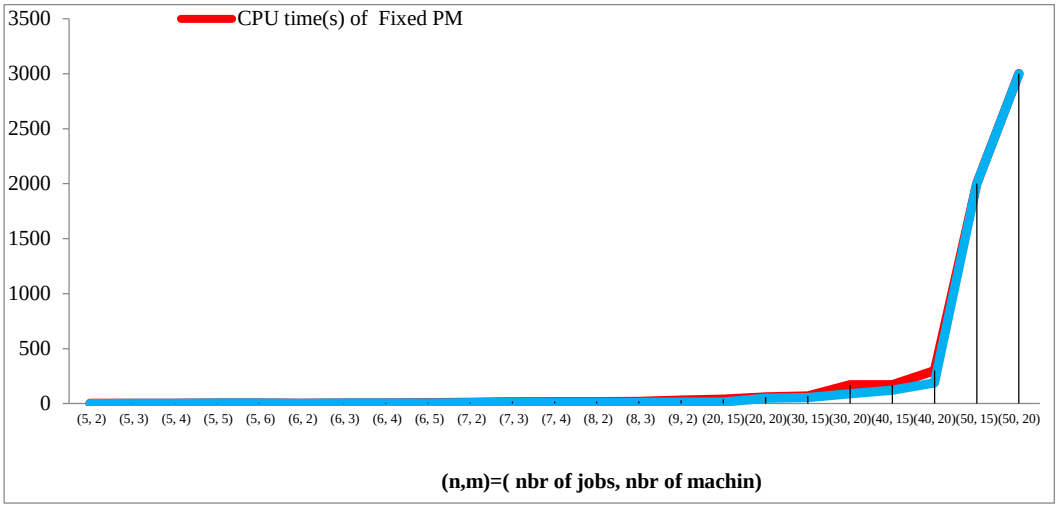

Figure 3.5: Temps moyens d'exécution pour les deux cas des problèmes considérés

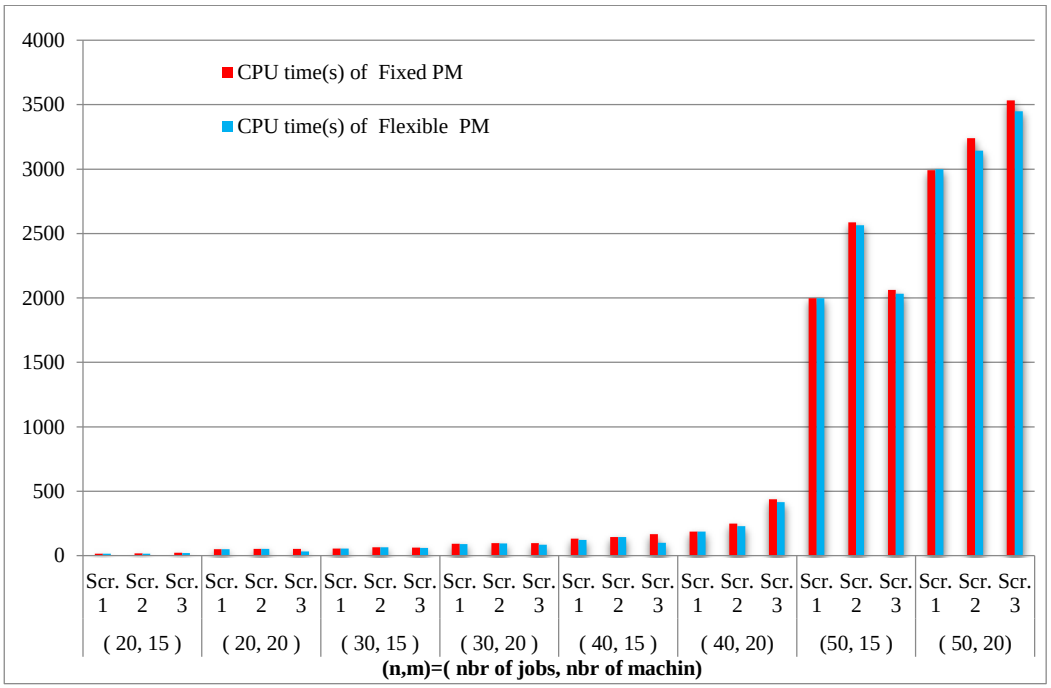

Figure 3.6: Comparaison des temps moyens d'exécution pour les deux cas des problèmes de grande taille

Comme montré sur la figure 3. 6, les temps de calcul moyens sont relativement raisonnables pour les problèmes de grande taille (moins de 500 secondes) du moment où le problème est inférieure à 50 tâches. Dès que la taille est égale à 50 tâches, les temps de calcul deviennent très importants. À titre d'exemple, pour la troisième instance du problème (50 tâches, 15 machines), le temps de réalisation pour le premier cas $\mathrm{Fm|nr-FIV|_{TEC}}$ est de 2062,92 secondes et pour le 2éme cas $\mathrm{Fm|nr-CIV|_{TEC}}$ est de 2032,82 secondes.

3.4.5.1. Analyse des problèmes de petite taille

Pour illustrer davantage l'impact du TEC sur le Cmax, une étude comparative de l'évolution de la consommation totale d'énergie et du Makespan en fonction des temps moyens d'exécution est établie pour les problèmes de petites tailles pour les deux cas étudiés $\mathbf{Fm|nr-FIV|_{TEC}}$ et $\mathbf{Fm|nr-CIV|_{TEC}}$ comme illustré dans la figure 3.7. De plus, du fait que les valeurs du TEC sont beaucoup plus importantes que celles du Cmax, une illustration meilleure des valeurs du Cmax pour les deux cas étudiés est présentée sur la figure 3.8.

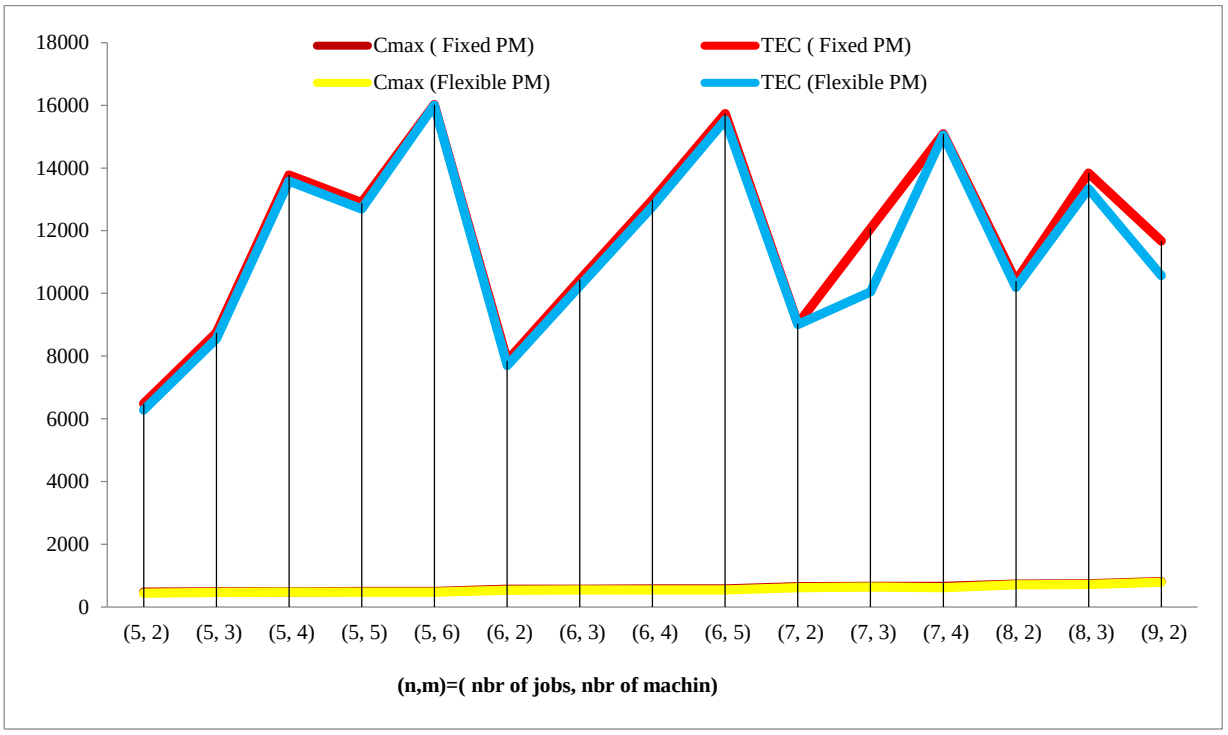

Figure 3.7 : Évolution de la consommation totale d'énergie et du Makespan en fonction des temps moyens d'exécution pour les deux cas des problèmes de petite taille

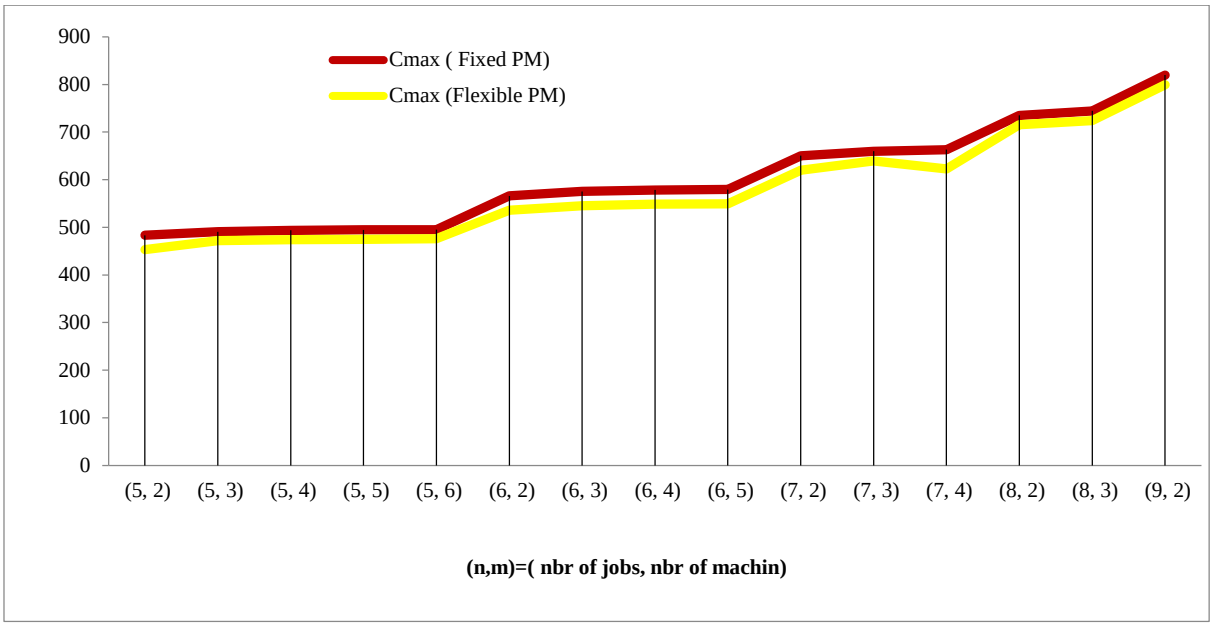

Figure 3.8 : Évolution du Makespan en fonction des temps moyens d'exécution pour les deux cas des problèmes de petite taille

D'après la figure 3.8, On constate que si on fixe le nombre des machines et on varie le nombre des tâches, une petite variation au niveau de la TEC est aperçue. En outre, si l'on prend par exemple le cas des instances (5,2) (6,2) (7,2) (8,2) (9,2), nous remarquons une variation très faible au niveau de la consommation énergétique pour le cas du premier problème $Fm|nr-FIV|_{TEC}$ est (6487, 7855, 9034, 10393 et 11672); respectivement, de même pour le cas du deuxième problème $Fm|nr-CIV|_{TEC}$ est (6282, 7705, 9005, 10193 et 10572); respectivement.

Semblablement pour le cas ou uniquement le nombre de job qui change, le constat est le même. À titre s'exemple pour les problèmes de taille (5,3) (6,3) (7,3) (8,3), consommation énergétique est de l'ordre de (2155, 8749, 10440, 12072 et 13834); respectivement pour le premier cas de problème $Fm|nr-FIV|_{TEC}$ et de même pour le deuxième cas $Fm|nr-CIV|_{TEC}$ la consommation énergétique est de l'ordre de (8547, 10240, 10052 et 13333); respectivement.

Par contre, au fur et à mesure que le nombre de machines augmentent, on remarque une variation considérable au niveau de la fonction objectif (TEC).

Le constat ressortit est que généralement le nombre de machines utilisé dans le traitement des tâches influe significativement sur la valeur optimale de la consommation énergétique.

Relativement au makespan, les valeurs fournies dans le tableau 3.5 et les figures 3.7 et 3.8 montrent que l'augmentation de la date d'achèvement finale de toutes les tâches engendre pratiquement une augmentation considérable au niveau de la consommation énergétique. Pour les instances (5,2) (5,3) (5,4) (5,5) et (5,6) le temps d'achèvement de toutes les tâches C_{max} est égale à (483.2, 490.6, 493.73, 494.78 et 495.13) et la consommation énergétique résultante est de (6487, 8749, 13779, 12893 et 16019); respectivement pour le premier cas de problème $Fm|nr-FIV|_{TEC}$ et de même pour le deuxième cas $Fm|nr-CIV|_{TEC}$ le temps d'achèvement de toutes les tâches C_{max} est égale à (453.2, 471.7, 473.74, 474.79 et 476.14) et la consommation énergétique résultante est de (6282, 8547, 13577, 12691 et 15999); respectivement comme on a montré dans le tableau 3.5.

3.4.5.2. Analyse des problèmes de grande taille

Même résonnement pour les problèmes de grande taille des deux cas étudiés $Fm|nr-FIV|_{TEC}$ et $Fm|nr-CIV|_{TEC}$, une étude comparative de l'évolution de la consommation totale d'énergie et du

Makespan en fonction des temps moyens d'exécution est établi pour les problèmes de grandes tailles pour illustrer davantage l'impact du TEC sur le Cmax ; comme illustré dans la figure 3.9. De plus, du fait que les valeurs du TEC sont beaucoup plus importantes que celles du Cmax, une illustration meilleure des valeurs du Cmax est présentée sur la figure 3.10.

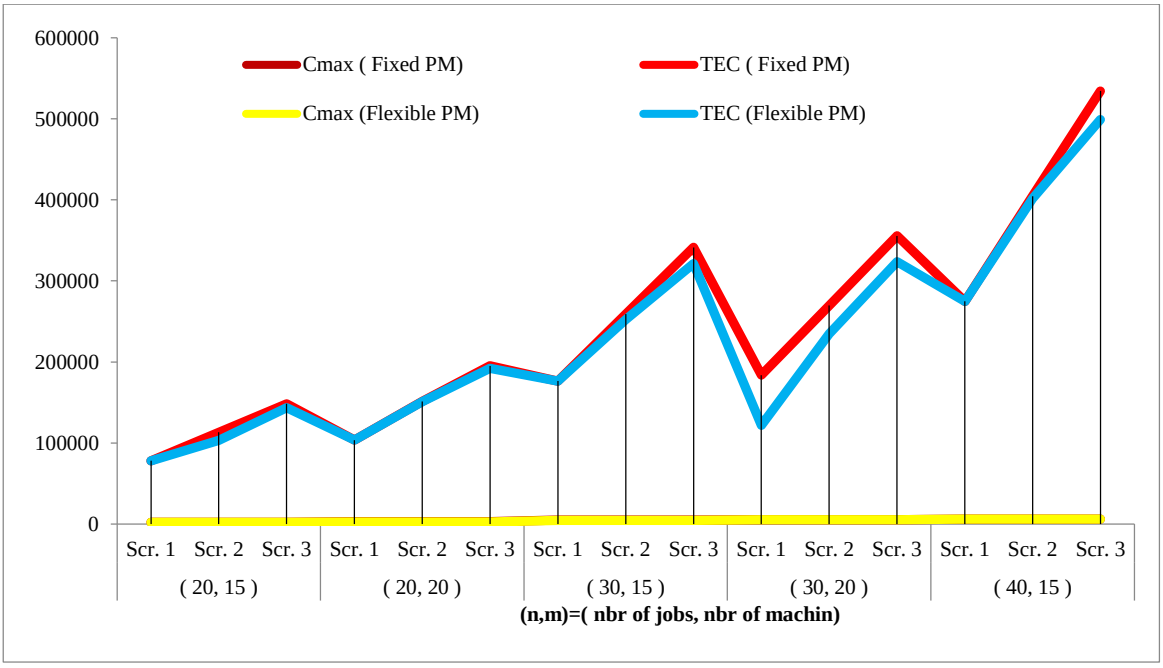

Figure 3.9 : l'évolution de la consommation totale d'énergie et du Makespan en fonction des temps moyens d'exécution pour les deux cas des problèmes de grande taille

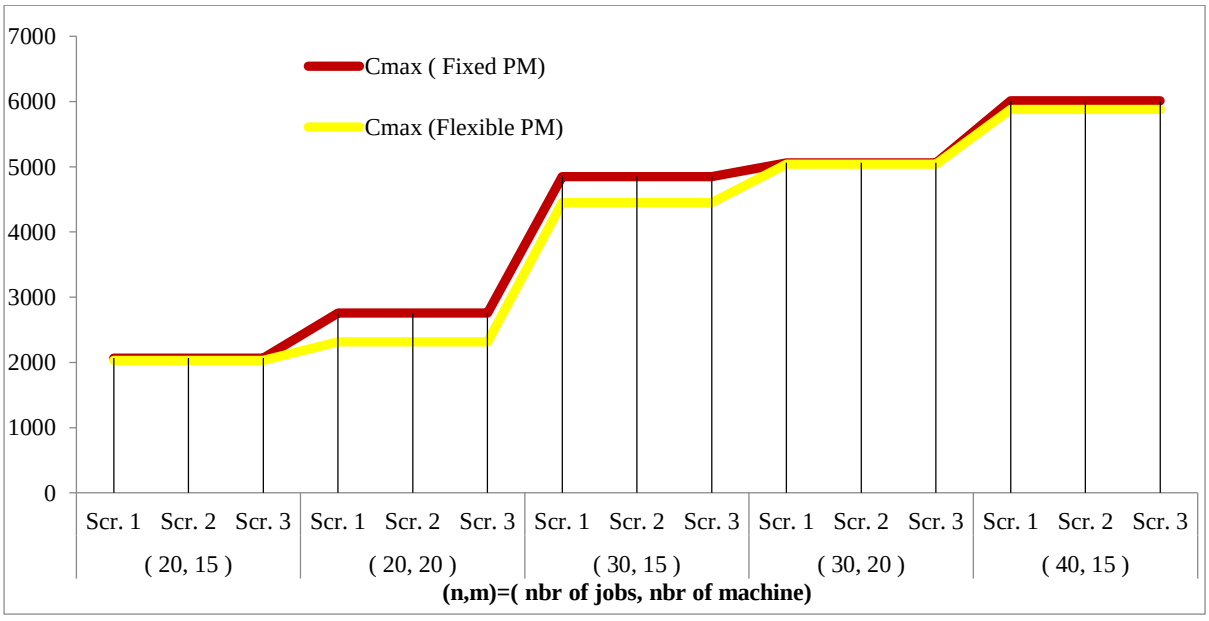

Figure 3.10 : Évolution du Makespan en fonction des temps moyens d'exécution pour les deux cas des problèmes de grande taille

D'après les figures 3.9 et 3.10, nous aboutissons au même constat ressortit pour les problèmes de petites tailles, la variation de la consommation énergétique dépend du type d'atelier étudié et du nombre des tâches exécuté. Comme illustré sur la figure 3.9, si on augmente la puissance commune des

installations auxiliaires de l'atelier, on remarque une augmentation considérable au niveau de l'énergie consommée, si l'on prend la première instante (20, 15) et nous considérons le passage du premier scénario P0=10 vers le deuxième P0=15, la valeur du TEC a connu une augmentation de 77982 à 113138 pour le premier cas $\mathrm{Fm|nr-FIV|_{TEC}}$ et de même pour le deuxième cas $\mathrm{Fm|nr-CIV|_{TEC}}$ la valeur du TEC a connu une augmentation de 77763 à 103139.

En effet, On constate aussi d'après la figure 3.9 que si on fixe le nombre des machines et on varie le nombre des tâches comme effectué par exemple sur le 3éme scénario pour les ateliers (20,15), (30,15) et (40,15), une petite variation au niveau de la TEC est aperçue 148294, 341373 et 534452; respectivement pour le premier cas $\mathrm{Fm|nr-FIV|_{TEC}}$ et de même pour le deuxième cas $\mathrm{Fm|nr-CIV|_{TEC}}$ 143393, 321373 et 499353; respectivement.

Par contre, au fur et à mesure que le nombre de machines augmentent, on remarque une variation considérable au niveau de la fonction objectif (TEC); À titre d'exemple pour le 3éme scénario avec ($P_0 = 20$) pour les scénarios (20,15) et (20,20) l'augmentation de la consommation énergétique est pratiquement remarquable 148294 et 195092; respectivement. De même pour le deuxième cas $\mathrm{Fm|nr-CIV|_{TEC}}$ l'augmentation de la consommation énergétique est pratiquement remarquable 143393 et 192192; respectivement.

De la même manière, le tableau 3.5 montre que relativement au makespan obtenus pour les problèmes de grandes tailles, les valeurs fournies dans le tableau 3.5 et les figures 3.9 et 3.10 montrent que l'augmentation de la date d'achèvement finale de toutes les tâches engendre une augmentation significative au niveau de la consommation énergétique. À titre d'exemple pour le deuxième scénario du premier cas $\mathrm{Fm|nr-FIV|_{TEC}}$ avec ($P_0 = 15$) pour des instances (20,15) et (20,20) le temps d'achèvement de toutes les tâches C_{max} est égale à (2068 et 2756.2); respectivement et la consommation énergétique suit cette variation avec des valeurs de (148294 et 195092); respectivement. Le même raisonnement pour le deuxième cas de $\mathrm{Fm|nr-CIV|_{TEC}}$ avec le même scénario et les même instances, l'augmentation de la consommation énergétique est pratiquement remarquable (143393 et 192192); respectivement pour les instances (20,15) et (20,20).

Nous constatons que les valeurs trouvées de TEC et Cmax par le 1ér cas de problème $\mathrm{Fm|nr-FIV|_{TEC}}$ est plus que les valeurs trouvées par le 2éme cas du problème $\mathrm{Fm|nr-CIV|_{TEC}}$ parce que dans le premier cas, où les intervalles d'indisponibilité sont fixés périodiquement par contre dans le second cas, où le temps de travail continu des machines, sans tenir compte du temps d'inactivité (temps mort), ne peut pas dépasser un temps maximum de TBF_j. De toute évidence, il n'ya pas d'écart entre la dernière tâche d'un lot et la période de la maintenance suivante, c'est-à-dire $G_{l,j} = 0$ comme mentionnée dans la 2éme section.

D'autre part, Il est évident que le Makespan augmente en fonction de l'augmentation de nombre des taches, par contre sa valeur reste presque négligeable devant la consommation totale d'énergie pour les deux cas $\mathrm{Fm|nr-FIV|_{TEC}}$ et $\mathrm{Fm|nr-CIV|_{TEC}}$ comme illustré dans le tableau 3.5 et dans les figures 3.9 et 3.10.

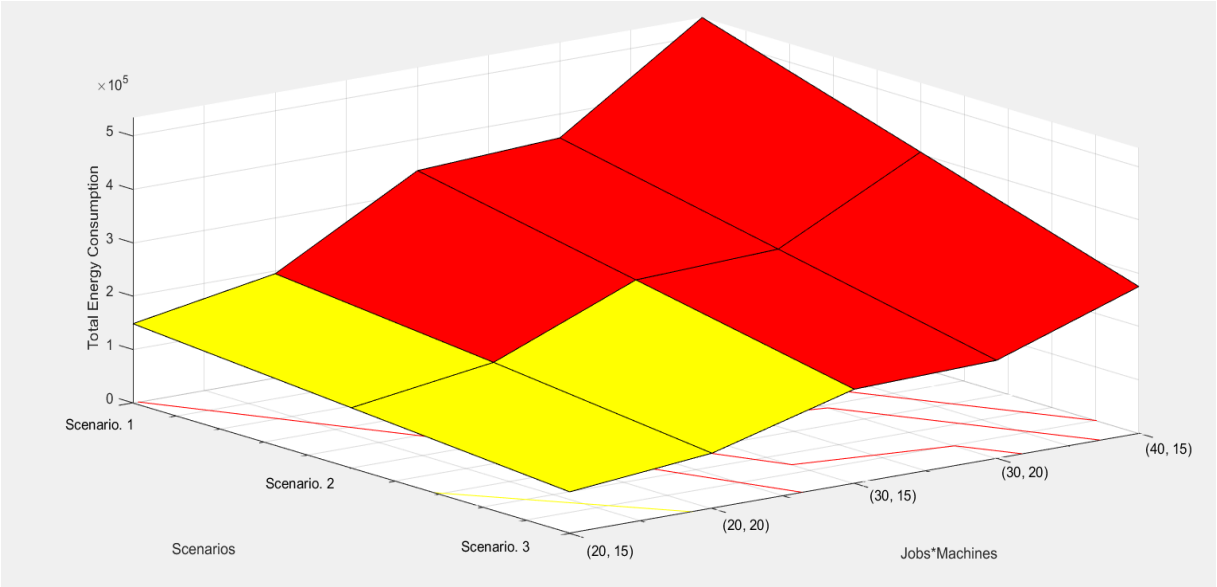

Figure 3.11: L'évolution de la consommation totale d'énergie en fonction des scénarios et des instances pour le 1^{ér} cas des problèmes de grande taille

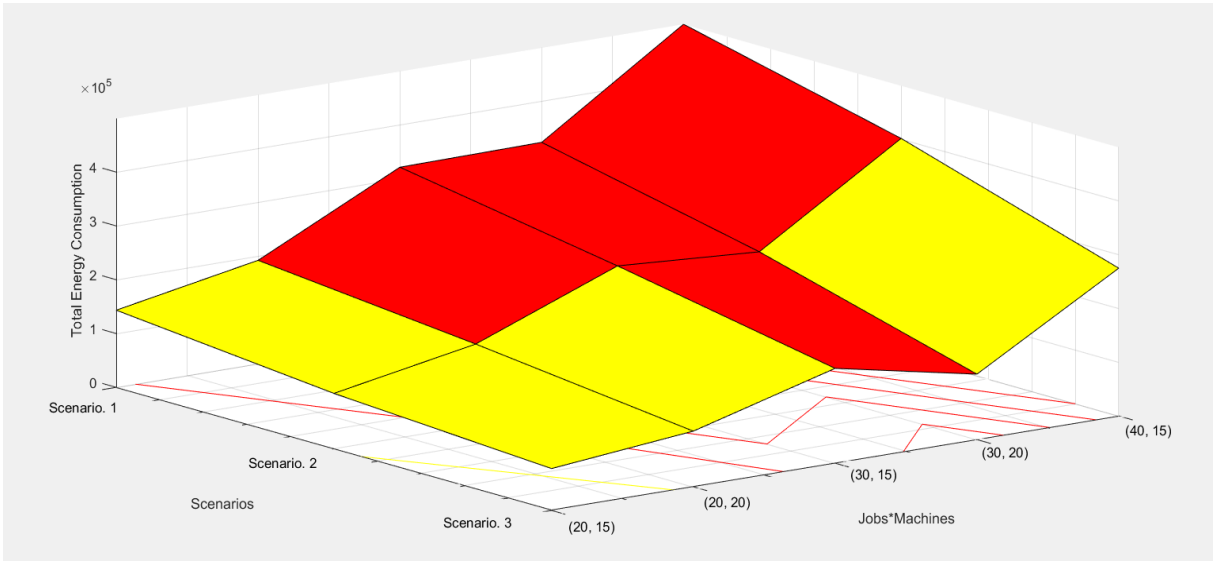

Figure 3.12 : L'évolution de la consommation totale d'énergie en fonction des scénarios et des instances pour le 2^{éme} cas des problèmes de grande taille

Les figures 3.11 et 3.12 représentent une illustration de la consommation énergétique effectuée à travers le logiciel Matlab dans les différentes configurations de l'atelier flow shop de non–permutation suivante pour les deux cas $Fm|nr-FI|_{TEC}$ et $Fm|nr-CI|_{TEC}$: (20jobs, 15machine), (20jobs, 20machine), (30jobs, 15machine), (30jobs, 20machine), (40jobs, 15machine), (40jobs, 20machine), (50jobs, 15machine) et (50jobs, 20machine). Cette illustration représente un graphe à 3 dimensions ((n, m), scénario, TEC).

La variation aperçue au niveau de la consommation énergétique présentée sur la figure 3.11 prouve que lorsqu'on a une petite puissance des installations auxiliaires comme on a mis dans le premier scénario avec $P_0 = 10$ la valeur de la consommation énergétique sera d'autant moins qu'on met une grande puissance comme montré dans le troisième scénario avec $P_0 = 20$. si l'on prend le cas de premier

scénario avec $P_0 = 10$, la consommation énergétique pour ce type d'atelier (20jobs, 15machine) est de 77982, pour $P_0 = 15$, on a comme valeur de TEC 113138 et finalement pour $P_0 = 20$, la valeur de TEC est de 148294; pour le premier cas $Fm|nr - FI|_{TEC}$ et de même pour le deuxième cas $Fm|nr - CI|_{TEC}$, si l'on prend le cas de premier scénario avec $P_0 = 10$, la consommation énergétique pour ce type d'atelier (20jobs, 15machine) est de 77763, pour $P_0 = 15$, on a comme valeur de TEC 103139 et finalement pour $P_0 = 20$, la valeur de TEC est de 143393 ; ce qui confirme ce qui est déjà été constatés dans les études de petites et de grandes tailles précitées.

3.5. Conclusion

Nous avons présenté dans ce chapitre des méthodes de résolution exactes pour les problèmes d'ordonnancement conjoint de la production et de la maintenance sous contraintes d'énergie dans un flow shop à deux et à plusieurs machines. Ce chapitre est consacré à la mise en œuvre d'une gestion intelligente de la charge en tant que solution pour le contrôle de la consommation (systèmes de contrôle, gestion optimale, variateurs de vitesse au sein de toutes les machines, ...). Dans la mesure où le problème consiste à affecter des tâches aux machines et à sélectionner un niveau de vitesse de traitement approprié pour chaque tâche, chaque individu est caractérisé par deux vecteurs : un vecteur d'affectation tâche-machine et un vecteur de vitesse. Par ailleurs, l'optimisation de la vitesse variable des opérations de traitement conduit à différents niveaux de consommation d'énergie. La présente étude porte sur deux cas d'ordonnancement de permutation et de non-permutation où la séquence de tâche n'est pas nécessairement identique sur toutes les machines : le premier est consacré à la Mise en place d'un ordonnancement écologique des tâches et de périodes de maintenance flexibles dans un atelier de permutation « Flow Shop à deux machines» afin de minimiser le Makespan et la consommation totale d'énergie. Un modèle linéaire d'optimisation à nombres entiers mixtes $F2|prmu - CIV|_{TEC}$ est fourni pour dériver l'ordonnancement optimal. Le second est relatif à la mise en œuvre de la stratégie Dynamic Speed Scaling (DSS) aux problèmes d'ordonnancement intégré de la production et de la maintenance sous contraintes de deux types d'indisponibilité fixes et flexibles dans l'atelier de non-permutation « Flow Shop à m machines» visant à minimiser la consommation totale d'énergie (TEC). Deux modèles de programmation binaires mixtes en nombres entiers $Fm|nr - FIV|_{TEC}$ et $Fm|nr - CIV|_{TEC}$ sont fournis pour dériver les ordonnancements optimaux, respectivement. Les performances des trois modèles de programmation binaires mixtes à nombres entiers proposés sont évaluées sur la base de la méthode exacte de séparation et d'évaluation intégrée sur le solveur CPLEX ainsi que d'autres analyses sur Matlab. Les performances des modèles développés ont été démontrées par une étude approfondie des résultats.

Comme perspective, nous proposerons une résolution approchée à travers une amélioration du fameux algorithme génétique élitiste de tri non-dominé (NSGA-II) pour résoudre les problèmes multi-objectifs. Avec l'intégration à un cas industriel des nouvelles techniques d'économie d'énergie afin de minimiser simultanément la consommation d'énergie totale et le temps d'achèvement de toutes les tâches de la production et de la maintenance.

Chapitre 4

Développement des approches multi-objectifs sous contraintes des techniques d'économie d'énergie «SMT, PDT, SLT et DRT» : Validation expérimentale

Chapitre 4
Développement des approches multi-objectifs sous contraintes des techniques d'économie d'énergie «SMT, PDT, SLT et DRT»: Validation expérimentale

4.1. Introduction

En raison de la réduction des ressources énergétiques fossiles et du risque majeur que représente le changement climatique pour l'avenir de notre planète, la consommation mondiale d'énergie augmente d'environ 2 % par an. L'ère de l'énergie disponible en abondance et extrêmement bon marché est révolue. Ainsi, l'énergie va devenir un bien plus rare et plus cher. Conformément aux Perspectives énergétiques internationales de l'administration américaine de l'information sur l'énergie [USE, 2016], les projections de la consommation mondiale totale d'énergie devraient passer de 549 quadrillions de BTU en 2012 à 815 quadrillions de BTU en 2040 [CUI, 2019]. Ce qui signifie qu'une augmentation de 48 % entre 2012 et 2040 contribuera à aggraver davantage la situation de pénurie d'énergie et de pollution de l'environnement. De ce fait, le développement durable et la mise en place d'une économie écologique attirent de plus en plus l'attention des chercheurs et des praticiens dans différents domaines ces derniers temps. Selon une étude récente, le secteur industriel représenterait 54 % de la consommation mondiale d'énergie [GRA, 1999]. Par ailleurs, les activités manufacturières sont responsables de 90 % de la consommation d'énergie et de 84 % des émissions de CO2 dans le secteur industriel [MOS, 2009].

De nombreux chercheurs s'accordent à dire que l'amélioration de l'efficacité énergétique des systèmes de production, à savoir les industries vertes, constitue une méthode efficace et une voie nécessaire vers un avenir plus propre. Dès lors, les activités lié es à l'énergie sont ajoutés à la considération lorsque les chercheurs tentent d'optimiser les objectifs économiques traditionnels [CHE, 2006a]. En pratique, les industries manufacturières sont confrontées à des perturbations. Ces ruptures sont généralement causées par des aléas de diverses natures : absentéisme des opérateurs, retards dans la livraison des matières premières, détérioration de la qualité des produits achetés, etc. Mais également par des pannes imprévues sur les ressources ou les équipements de production. En effet, une défaillance peut survenir pendant l'exécution d'une tâche de production, ce qui peut avoir des conséquences catastrophiques sur la chaîne de production et entraîner des incidents compromettant l'ensemble des équipements de production, le personnel des ateliers et l'environnement en général. De toute évidence, la mise en œuvre d'une politique de maintenance intelligente est nécessaire pour améliorer les performances de l'entreprise et garantir en même temps la sécurité d'exploitation et la sûreté [SAD, 2018a].

Dans les chapitres précédents, des modèles mathématiques, des approches exactes et approchées, ont été proposés afin de supporter théoriquement les bonnes prises de décisions relatives à l'ordonnancement de la production et de la maintenance des systèmes industriels. Toutefois, la qualité des solutions produites par les différentes approches proposées et qui ont permis effectivement de bien orienter cette prise de décision opérationnelle nous a laissé présager de réelles possibilités d'application industrielle.

Partant de ce constat, une étude de cas a été effectuée au sein de l'entreprise MARTURFOMPAK INTERNATIONAL au Maroc. L'objectif de cette étude de cas gravite autour de la validation expérimentale de toutes les techniques suggérées précédemment pour minimiser la consommation énergétique d'une part, et la résolution des problématiques posées par un industriel chargé de la gestion

de production et de maintenance des lignes d'autre part. Dans ce contexte, la société MARTURFOMPAK est équipée des lignes de production des sièges automobiles et des lignes de fabrication des coussins en mousse dans lesquelles les contraintes d'indisponibilité et d'énergie dominent fortement. La combinaison de l'objectif économique et de l'impact environnemental conduit à des approches multi-objectifs.

Pratiquement, les problématiques posées au niveau de chaîne de production de cette entreprise touchent de très près les systèmes d'ordonnancement étudiés, il s'agit de minimiser les coûts énergétiques ainsi de minimiser simultanément la consommation d'énergie totale et le Makespan. Pour ce faire, un modèle a été proposé et une résolution approchée à travers une amélioration de l'algorithme génétique élitiste de tri non-dominé (NSGA-II) est effectuée pour résoudre le système précité en fonction des paramètres de l'atelier de production sous le logiciel python dans la version 3.6. Ainsi, une résolution exacte de branch-and-bound intégrée sur le solveur CPLEX est effectuée pour résoudre le modèle d'ordonnancement de la production et de la maintenance afin de minimiser les coûts de production liés au temps de réalisation de l'atelier de fabrication des coussins en mousse.

4.2. Problématique industrielle soulevée

Martur Fompak fondée en 1985 pour produire de la mousse moulée. La société Martur est désormais l'un des principaux producteurs de sièges d'automobile dans le monde. L'entreprise conçoit et fabrique des sièges pour les voitures particulières ainsi que pour les utilitaires légers. En outre, la société conçoit et fabrique également du tissu pour automobile et des structures de sièges. Martur produit des sièges d'automobile de haute qualité et conformes aux normes internationales.

MARTURFOMPAK
INTERNATIONAL
MARTUR



Figure 4.1 : Aperçu global de l'entreprise étudiée

Dans le cadre de cette recherche, l'enquête s'est concentrée uniquement sur les lignes de production des sièges d'automobile et l'atelier de fabrication des coussins en mousse.
La figure 4.2 montre la nomenclature du produit fini. Les composants sont fabriqués séparément dans plusieurs lignes de production et expédiées à la chaîne de production pour être assembler.

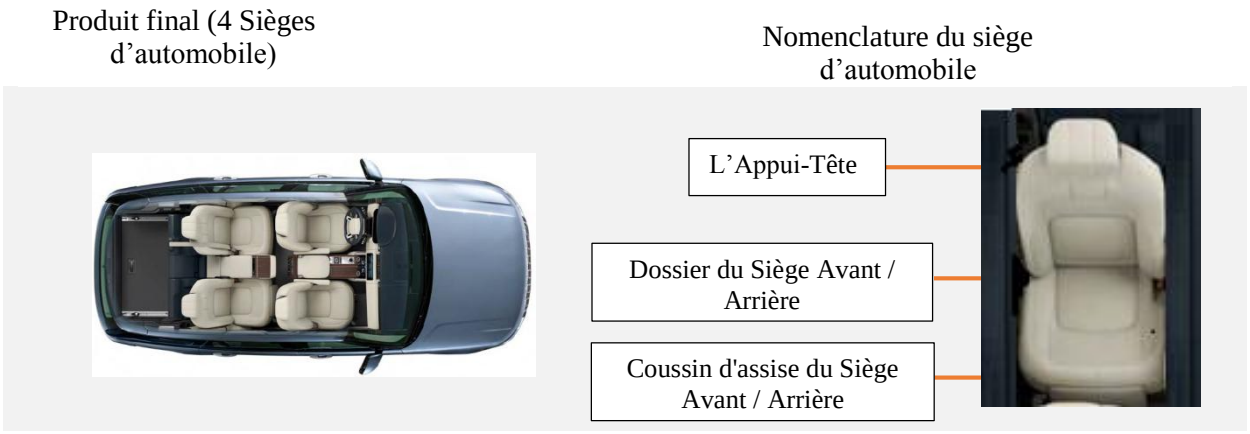

Figure 4.2 : Nomenclature relative au produit fini

Avant sa mise sur le marché, chaque siège automobile franchit plusieurs étapes dans des machines de production distinctes. Cette partie de recherche vise principalement à concrétiser et valider l'efficacité des approches de résolution et des modèles proposés dans le cadre de cette thèse, et répond particulièrement à deux problématiques industrielles posées par un industriel chargé de la gestion de production et de maintenance de cette entreprise. Les problématiques soulevées par l'industriel sont décrite dans le tableau 4.1.

Tableau 4.1 : Problématiques et pistes de réflexion au sein de l'entreprise

Problématiques		**Questions de recherche ?**	**Ateliers relatifs à ces questions**	**Modèles et solutions proposées**
1ère problématique	Forte consommation d'énergie due au processus et aux installations auxiliaires § Nombre important des arrêts imprévus occasionnés par des pannes	Comment adopter une approche multi-objectifs plus intelligente et plus ciblée face aux questions écologiques et environnementales ?	**lignes de production des sièges d'automobile** 	En intégrant à un véritable cas industriel trois nouvelles techniques d'économie d'énergie afin de minimiser simultanément la consommation d'énergie totale et le temps d'achèvement de toutes les tâches de la production et de la maintenance, notamment : - Switching On/Off Machine Technique (SMT) - Peak Demand Technique (PDT) - Speed Level Technique (SLT) $\mathbf{Fm\|nr-CIV\|_{C_{max},TEC}}$
2ème problématique	Hausse des coûts de l'électricité indispensable au traitement de tous les jobs	Comment augmenter l'efficacité énergétique industrielle? Comment minimiser les coûts totaux de l'électricité de l'atelier?	**Ligne de production de mousse de polyuréthane PU injectée pour les coussins des sièges d'automobile** 	En intégrant à un véritable cas industriel une nouvelles techniques d'économie d'énergie afin minimiser la somme de la durée de fonctionnement multipliée par le coût de la pénalité (ou le coût du temps supplémentaire) et le coût total de l'électricité, notamment : - Mise en œuvre de la technique de réponse à la demande de (DRT) dans la ligne de production de mousse : $\mathbf{Rm\|nr-CI-DRT\|_{Totat\ Cost}}$

4.3. Formulation mathématique multi-objectifs de la 1ère problématique du modèle flowshop : Forte consommation d'énergie due au processus de production des sièges d'automobile

En se basant sur les mêmes hypothèses de la modélisation et l'optimisation décrites dans le chapitre précèdent, pour modéliser le système mono-objectif qui minimise la consommation totale d'énergie (TEC) dans le cadre de la stratégie de mise à l'échelle dynamique de la vitesse (DSS) dans l'ordonnancement conjoint de la production et de la maintenance [SAD, 2020b].

Nous présentons dans cette section la formulation mathématique permettant de modéliser cette fois-ci le système multi-objectif qui minimise simultanément le makespan et la consommation totale d'énergie. En intégrant à un véritable cas industriel trois nouvelles techniques d'économie d'énergie, notamment (Switching On/Off Machine (SMT), Peak Power Demand Technique (PDT) et Speed Level Technique (SLT)).

Pour ce faire, nous étudions un atelier flowshop composé de plusieurs machines $M = \{M_1, M_2, \dots, M_m\}$. Ainsi, un ensemble des tâches $J = \{J_1, J_2, \dots, J_n\}$ doit être exécuté sur un ensemble des machines M. Chaque tâche J_i ($J_i \in J$) consiste en une séquence de m opérations $\{O_{i1}, O_{i2}, \dots, O_{im}\}$ et nécessite une charge de travail de traitement des tâches, ce qui correspond à un temps de traitement de base $w_{i,j}$, avec :

- Toutes les tâches sont disponibles au début de l'horizon d'ordonnancement, le temps d'achèvement de la dernière tâche est désigné par Cmax, qui correspond à son temps d'achèvement sur la dernière machine.
- Pour garantir une grande fiabilité, les MP doivent être effectuées périodiquement pour chaque machine.
- En ce qui concerne le temps de maintenance de M_j , il est égal à PM_j .
- Lorsqu'une période de la maintenance est exécutée sur une machine, celle-ci ne peut pas traiter la tâche en même temps. En effet, pour exécuter une PM, l'opérateur doit éteindre la machine et arrêter le traitement. La préemption des opérations n'est pas autorisée, c'est-à-dire que le cas de non-renouvellement est considéré ici.
- Au cours d'une période PM, la durée réelle de fonctionnement de la machine ne peut être supérieure à un seuil TBF_j.

Tableau 4.2 : Variables de décisions utilisées pour formuler le problème multi-objectif flowshop

Variables de décisions :	
$x_{i,j,k,s}$	$\begin{cases} 1 & \text{si le job i est traité à la kième position sur la machine } M_j \text{ avec un niveau de vitesse s.} \\ 0 & \text{sinon} \end{cases}$
$Z_{k,j}$	$\begin{cases} 1 & \text{S'il y a une configuration ou un setup time juste avant } O_{k,j} \\ 0 & \text{sinon} \end{cases}$
$y_{k,j}$	$\begin{cases} 1 & \text{S'il y a une PM immediatement avant } O_{k,j} \\ 0 & \text{sinon} \end{cases}$

Variables de décision auxiliaires :	
$z_{t,j,k}$	$\begin{cases} 1 \text{ si } O_{k,j} \text{ est commencé dans le tième intervalle et qu'il y a une configuration avant } O_{k,j} \\ 0 \text{ sinon} \end{cases}$
$T_{k,j}$	Temps de traitement réel de $O_{k,j}$.
$P_{k,j}^{Processing}$	Consommation d'énergie réelle par unité de temps lors du traitement $O_{k,j}$.
$S_{k,j}$	Heure de début de $O_{k,j}$.
$C_{k,j}$	Heure de fin de $O_{k,j}$.
$b_{k,j}$	L'âge de la machine juste avant $O_{k,j}$.
$a_{k,j}$	L'âge de la machine immédiatement après $O_{k,j}$.
$TEC_{t,j}$	Consommation d'énergie de la machine M_j pendant le tième intervalle.
$PEC_{t,j,k}$	Consommation d'énergie en fonctionnement de M_j engendrée par le traitement de$O_{k,j}$ durant le tième intervalle.
$IEC_{t,j,k}$	Consommation d'énergie en veille de M_j résultant du temps d'inactivité avant $O_{k,j}$ durant le tième intervalle.
$SEC_{t,j,k}$	Consommation d'énergie de configuration de M_j résultant d'un setup time avant $O_{k,j}$ dans le tième intervalle.

Trois modes de fonctionnement sont associés à chaque machine: off/idle/work. Ce qui correspond à quatre temps envisageables au sein de chaque machine, détaillées ci-après dans le tableau 4.3.

Tableau 4.3 : Synthèse des modes de fonctionnement de la machine sous SMT

OFF TIME	IDLE TIME	SETUP TIME	WORK TIME
Machine en arrêt	Machine en veille	Mise en démarrage de la machine	Mise en fonctionnement de la machine
Au début de l'horizon de production, chaque machine est éteinte.	Pendant le fonctionnement d'une machine et le fait que cette machine ne traite aucune opération, cette dernière est mise en veille.	Néanmoins, quand la machine est reconfigurée, une énergie additionnelle est consommée de l'état d'arrêt à l'état de marche.	La machine doit être mise en marche pour traiter le premier travail et arrêtée après avoir terminé tous les jobs.
La demande de puissance de la machine est nulle lorsqu'elle est éteinte, d'où la consommation d'énergie est évidemment nulle.	la consommation d'énergie par unité de temps de M_j est égale à IEC_j.	la consommation d'énergie de M_j est supposée être égale à SEC_j , qui est une constante.	La consommation d'énergie de traitement des taches dans M_j est égale à PEC_j

Une technique efficace (SMT) pour économiser l'énergie lorsque la machine est inactive consiste à l'éteindre. Il convient donc de comparer la consommation d'énergie de M_j pendant le temps de veille et de décider de l'arrêter. Sachant que, les opérations de mise en marche et d'arrêt supplémentaires pendant

l'horizon d'ordonnancement doivent être décidées en fonction de l'ordonnancement de la production et des PMs.

4.3.1. Intégration des nouvelles techniques d'économie d'énergie

La réduction de la consommation d'énergie et l'amélioration de la durabilité constituent un challenge considérable pour les entreprises manufacturières. La problématique d'ordonnancement intégrant les contraintes énergétiques et environnementales, demeure une question assez restreinte non encore concrétisée. À cet égard, faire progresser le concept d'industrialisation en adoptant une approche plus intelligente et plus ciblée sur les questions écologiques et environnementales. En intégrant à cette application industriel les trois nouvelles techniques (SMT, PDT et SLT) afin de minimiser simultanément la consommation d'énergie totale et le temps d'achèvement de toute les Tâches de la production et de la maintenance.

4.3.1.1. Switching on/off Machine Technique (SMT)

Du fait de la discontinuité du système de production dans l'industrie manufacturière, les machines de production ne peuvent pas éviter l'état d'inactivité en cours de traitement des tâches. Dans les pratiques en vigueur dans les usines, durant la période d'inactivité, les machines en veille consomment des quantités d'énergie conduisant à une dépense énergétique inévitable. En améliorant l'ordonnancement, il s'agit d'une nouvelle technique pour optimiser la consommation d'énergie du système, qui consiste à éteindre la machine pour aider le système à économiser plus d'énergie. Cela permet d'éteindre la machine en temps d'inactivité jusqu'à la prochaine opération. Cependant, des études pertinentes ont montré que le mécanisme d'arrêt de la machine peut réduire efficacement la consommation d'énergie dans la production [LI, 2011], [LIU, 2013], [MOU, 2008] et [MAS, 2013].

Deux possibilités sont envisageables pour une machine en temps d'inactivité : la première est de la maintenir en mode veille et la seconde est d'éteindre la machine.

- Pour la mise en marche d'une machine, il y a un ordre de démarrage entre divers sous-systèmes de distribution d'énergie.
- Pour la mise hors tension, le déroulement des séquences sont généralement dans l'ordre inverse de la mise en marche dans la pratique.

Dès lors, des économies d'énergie seront réalisées en éteignant la machine au repos, puis en la remettant en marche avant l'arrivée d'une nouvelle tâche.

Une telle configuration a été définie comme une opération de "réglage" dans [LI, 2011], qui a été adoptée dans notre étude. Le mécanisme économe en énergie consiste donc en l'exécution d'une opération de réglage, comme le montre la figure 4.3.

Pour mettre en application cette technique d'efficacité énergétique, il est indispensable de déterminer si les machines en veille doivent être éteintes.

La figure 4.3 illustre le diagramme de puissance de la machine qui maintient le mode veille en temps d'inactivité, ainsi que le diagramme de puissance de la machine dont la mise en place de la technique **SMT**.

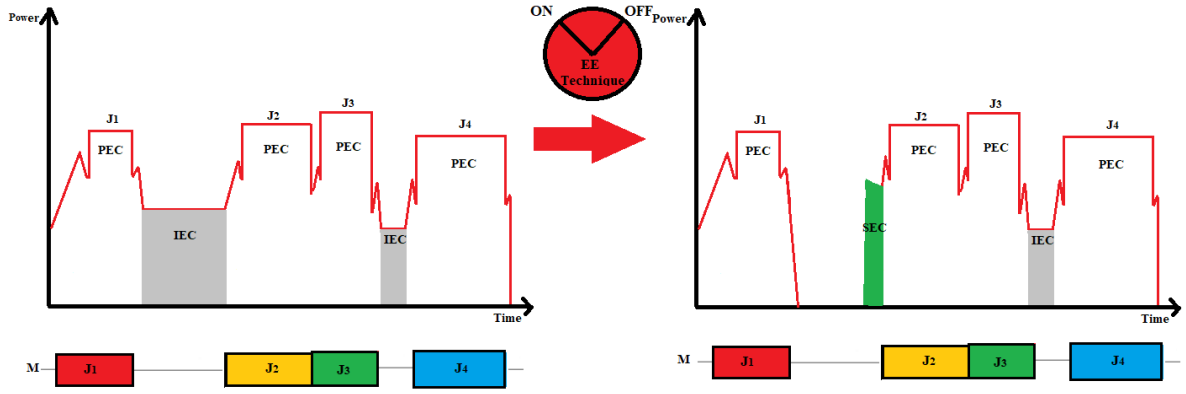

Figure 4.3 : Diagramme synoptique de la technique SMT

Sur la base d'une analyse précédente, une opération de configuration prend au moins un temps prédéfini (TSetup), de sorte que la consommation d'énergie correspondante E_j^{ON-OFF} est une commutation de la consommation d'énergie des équipements et machines-outils. Si l'équipement reste inactif trop longtemps, il consommera beaucoup d'énergie. Dans ce cas, il est possible d'économiser l'énergie en adoptant une stratégie de mise en marche/arrêt.

4.3.1.2. Peak Demand Technique (PDT)

La contrainte de la demande de pointe doit être respectée et la demande maximale de puissance du système de production doit être inférieure à un seuil promis $\overline{D}$. Dans la pratique, il est fréquent que la compagnie d'électricité propose cette exigence lorsqu'elle signe le contrat avec son client industriel.

Il est évident que, les pics de demande sont définis comme les kW moyens les plus élevés mesurés dans chaque intervalle de temps δ (généralement 15 min) pendant l'horizon de production. Nous supposons que $\overline{D}$ est inférieur à $\sum_{j=1}^{m} e_{jL_j}$; $\overline{D} << \sum_{j=1}^{m} e_{jL_j}$. Autrement, tous les types de combinaisons de vitesses sont possibles, ce qui signifie que la contrainte de la demande de pointe est trop large. Nous supposons que $\overline{D}$ est plus grand que $\sum_{j=1}^{m} e_{j1}$. Sinon, la contrainte de demande de pointe est trop forte. Les entreprises manufacturières négocient avec la compagnie d'électricité pour augmenter leur demande maximale d'électricité. La figure 4.4 illustre l'intérêt de la mise en œuvre de la PDT au sein des entreprises.

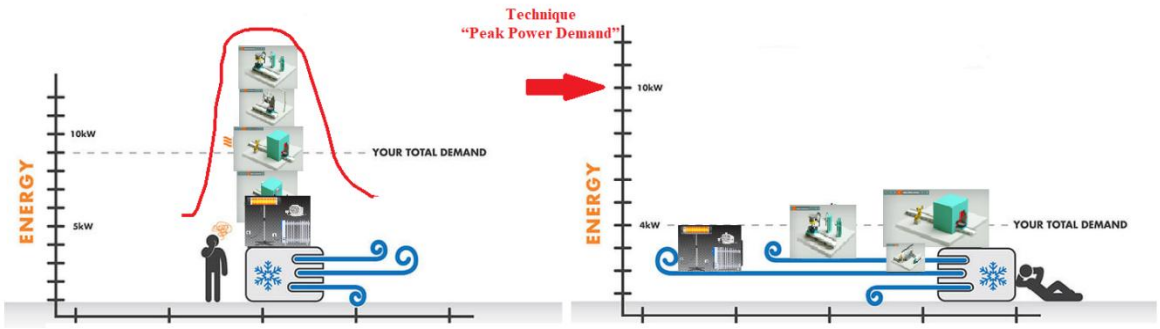

Figure 4.4 : Diagramme synoptique de la technique PDT

4.3.1.3. Speed level Technique (SLT)

Dans le cas où une tâche est traitée sur une machine, le niveau de vitesse de celle-ci en l'état de fonctionnement doit être sélectionné. On peut distinguer un ensemble fini et discret de niveaux de vitesse $Level_j = \{1,2,\dots,L_j\}$ pour chaque machineM_j. Ainsi, les vitesses fixées sont $\{V_{j1}, V_{j2}, \dots, V_{js}\}$

pour différents niveaux. L'ensemble de la demande de puissance est $\{e_{j1}, e_{j2}, \dots, e_{jL_j}\}$. Le temps de traitement réel de $O_{i,j}$ est égal à $\frac{w_{i,j}}{V_{j1}}$ lorsque M_j est au niveau 1; en attendant, la consommation d'énergie de M_j est égale à e_{j1} pendant une unité de temps. Il est évident que le temps de traitement réel est plus court avec un niveau de vitesse plus élevé et que la demande de puissance est plus importante en même temps. En outre, nous supposons que $e_{j1}\left(\frac{w_{i,j}}{V_{j1}}\right) < e_{j2}\left(\frac{w_{i,j}}{V_{j2}}\right)$, ce qui signifie que la consommation totale d'énergie associée à une opération est plus importante lorsque le niveau de vitesse est plus élevé. Cette solution est pratique dans l'industrie et également approuvée dans la littérature [SAD, 2019b].

4.3.1.4. Exemple illustratif

La consommation totale d'énergie pendant l'horizon d'ordonnancement comprend : la consommation de réglage des machines, la consommation d'énergie pendant le temps de traitement des taches, la consommation d'énergie pendant les temps d'inactivité.

Dans la perspective de minimiser la consommation totale d'énergie, l'ordonnancement de la production doit être optimisé. Comme mentionné ci-avant, trois volets interdépendants sont intégrés dans notre modèle de décision.

- Premièrement, les séquences de production et le niveau de vitesse pour chaque opération doivent être déterminés.
- Deuxièmement, pour garantir une grande fiabilité, les PM doivent être effectuées périodiquement pour chaque machine.
- Troisièmement, l'arrêt et la mise en marche des machines doivent être décidés de manière à minimiser la consommation totale de l'énergie en tenant compte de la contrainte de la demande de pointe.

La figure 4.5 illustre une solution intégrée pour un exemple avec cinq machines et cinq taches :

- Les différentes tâches sont présentées par des différentes couleurs.
- La case noire signifie que la machine est éteinte pendant ce temps.
- La case avec des lignes d'ombre signifie qu'un PM fonctionne pendant ce temps.
- Le caractère "{}" indique le niveau de vitesse de la machine pendant cette période.
- Chaque intervalle de temps est indiqué sur δ.

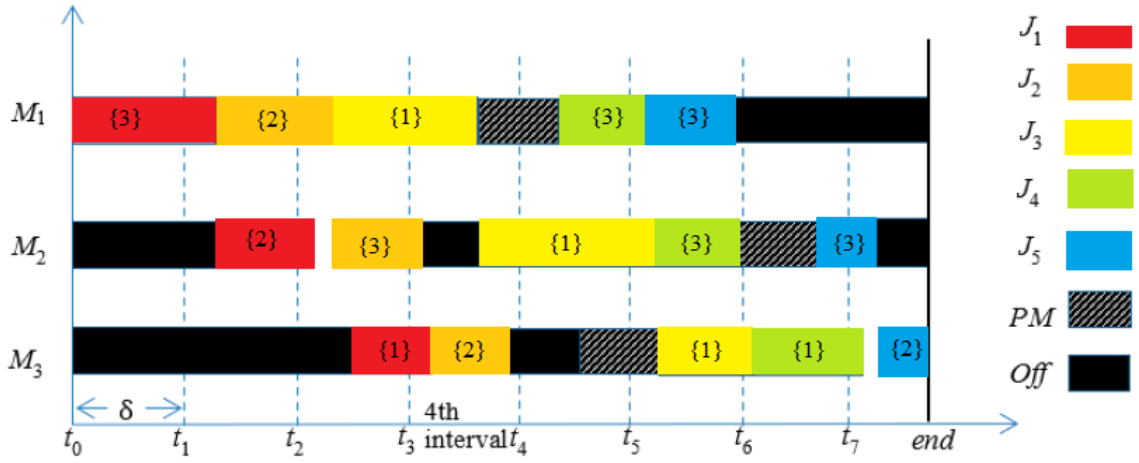

Figure 4.5 : Diagramme de Gantt illustrant la solution intégrée pour: $\boldsymbol{Fm|nr-CIV|_{C_{max},TEC}}$

Pour le problème $\mathbf{Fm|nr-CIV|_{C_{max},TEC}}$ **:**

- En machine M_1 , une PM est effectuée entre J_3 et J_4. Sinon, l'âge de la machine serait plus grand que le seuil après sans ce PM.

Dans la machine M_2, le temps d'inactivité existe entre J_1 et J_2 . La machine n'est pas arrêtée car le temps d'inactivité est très court, ce qui se traduit par une consommation d'inactivité inférieure à.SEC_2 . En conséquence, il existe une configuration entre J_2 et J_3.

- Dans la machine M_3, le job J_1 est démarré plus tard que son heure de fin M_2 car la demande de puissance moyenne pendant $[t2, t3]$ doit être inférieure à $\overline{D}$. De plus, la durée est très longue entre J_2et J_3 puisque J_3 ne peut être démarrée qu'après son heure de fin en M_2 . Ainsi, la machine M_3 est arrêtée pour économiser de l'énergie après avoir terminé le job J_2 . Dans la mesure où la durée est plus longue que la durée de maintenance, il s'agit d'une bonne occasion d'effectuer une PM, même si l'âge de la machine n'atteint pas le seuil.

Dans ce contexte, la demande moyenne de puissance dans le 4e intervalle est calculée comme suit :

- Soit C_{31} est l'heure de fin de J_3 dans la machine M_1 ;
- soit $\mathbf{C_{22}}$ est l'heure de fin de J_2 dans la machine M_2 ;
- Soit $\boldsymbol{S_{32}}$ est l'heure de début J_3 de dans la machine M_2 ;
- soit $\boldsymbol{C_{13}}$ est l'heure de fin de J_1 dans la machine M_3 ;
- Soit $T_{2,3}$ est le temps de traitement réel de J_2 dans la machine M_3 ;

D'où, la consommation totale d'énergie peut être obtenue comme suit:

$$\mathbf{TEC} = (\mathbf{C_{31}} - \mathbf{t_3})\,\mathbf{e_{11}} + (\mathbf{C_{22}} - \mathbf{t_3})\,\mathbf{e_{23}} + \mathbf{SEC_2} + (\mathbf{t_4} - \mathbf{S_{32}})\,\mathbf{e_{21}} + (\mathbf{C_{13}} - \mathbf{t_3})\,\mathbf{e_{31}} + \mathbf{T_{2,3}}\ \mathbf{e_{23}}$$

Ainsi, la demande de puissance moyenne dans le quatrième intervalle est égale à TEC / δ, qui doit être inférieure à la donnée $\overline{D}$. Pour les problèmes d'ordonnancement traditionnels de l'atelier flowshop sans tenir compte de l'objectif lié à l'énergie, un programme non-delay est optimal pour minimiser le makespan, qui s'avère être NP-difficile.

Dans notre étude, le problème intégré est beaucoup plus compliqué que le problème traditionnel. Compte tenu de la séquence des jobs, du niveau de vitesse, des PM et de la technique ON/OFF de la machine, la taille de l'espace de recherche est : $(n!)[\prod_{j=1}^{m}(L_j)^n]\,(2^{nm})(2^{nm})$.

En outre, des temps de tampon supplémentaires doivent être insérés dans le programme car la contrainte de demande de pointe doit être respectée. Ainsi, les problèmes intégrés sont des problèmes MIP (Mixed Integer Programming) avec des variables discrètes et des variables continues. La prise en compte de la consommation d'énergie totale et de makepan permet d'établir un modèle mathématique multi-objectif :

Sur la base de la deuxième technique appliquée dans cette section de la demande de pointe « Peak Demand Technique (PDT) », les intervalles de temps du tième intervalle $[WS_t, WE_t]$ sont égaux à $[(t-1)\delta, (t)\delta]$. Avec :

- T est le nombre des intervalles.
- O_{kj} la kième opération sur la machineM_j .
- $\overline{H}$ est une très grande constante.
- $\underline{H}$ est une très petite constante qui est supérieure à zéro.

4.3.2. Fonction multi-Objectifs : Cas du modèle flowshop

La contribution de notre étude est d'établir un modèle intégré d'ordonnancement de la production et de la maintenance afin de minimiser une fonction multi-objectifs sous contraintes de trois nouvelles techniques d'économie d'énergie.

Notre fonction multi-objectifs permet de minimiser simultanément le makespan C_{max} et la consommation totale d'énergie associée à un ensemble des tâches TEC, qui comprend en majeure partie la consommation d'énergie des équipements et machines-outils utilisés pour le traitement des opérations, la consommation d'énergie relative aux équipements de fabrication résultant du temps d'inactivité et la consommation d'énergie de provenant du temps de réglage.

4.3.2.1. Consommation d'énergie de traitement (PEC)

S'agissant de l'énergie consommée par les équipements d'usinage (tels que tour, fraisage, rectifieuse) et machines-outils M_j lors du traitement des opérations, la consommation d'énergie en fonctionnement peut être calculée comme suit,

$$PEC_{t,j,k} = \{\max(0, \min(C_{k,j}, WE_t) - \max(S_{k,j}, WS_t))\} P_{k,j}^{Processing} \; ; \; \forall t, k, j \quad (4.1.1)$$

Consommation d'énergie des équipements et machines-outils M_j engendrée par le traitement de $O_{k,j}$ durant le tième intervalle. Notamment, $P_{k,j}^{Processing}$ est la puissance de l'équipement dans des conditions normales de traitement au cours de la jéme tâche.

4.3.2.2. Consommation d'énergie d'inactivité (IEC)

Pendant le fonctionnement d'une machine et le fait que cette machine ne traite aucune opération, cette dernière est mise en veille, la consommation d'énergie relative aux équipements de fabrication résultant du temps d'inactivité, qui peut être calculée à l'aide de l'équation suivante (4.1.2),

$$IEC_{t,j,k} = \{\max(0, \min(s_{k,j}, WE_t) - \max(C_{k-1,j}, WS_t))\} P_j^{Standby}(1 - z_{k,j}) \; ; \; \forall t, k, j \quad (4.1.2)$$

Consommation d'énergie de l'équipement en état de veille M_j résultant du temps d'inactivité avant $O_{k,j}$ durant le tième intervalle.

Elle montre que, si une configuration existe pendant le temps d'inactivité entre $O_{k-1,j}$ et $O_{k,j}$, alors aucune consommation d'énergie n'a lieu pendant ce temps d'inactivité ; sinon, la consommation d'énergie pendant le temps d'inactivité doit être prise en compte. Lorsque la technique Switching On/Off Machine (TSM) n'est pas adoptée, l'énergie consommée dans l'intervalle de temps fait partie de la veille automatique.

4.3.2.3. Consommation d'énergie de configuration (SEC)

L'E_j^{ON-OFF} est une commutation de la consommation d'énergie des équipements et machines-outils. Si l'équipement reste inactif trop longtemps, il consommera beaucoup d'énergie. Dans ce cas, il est possible d'économiser l'énergie en adoptant une stratégie de mise en marche/arrêt. En effet, la consommation résultant d'une configuration (setup time) avant $O_{k,j}$ dans le tième intervalle. Cette reconfiguration de la machine consomme de l'énergie supplémentaire, qui passe de l'état "off" à l'état "on".

$$SEC_{t,j,k} = z_{t,j,k} E_j^{ON-OFF} \quad ; \; \forall t, k, j \quad (4.1.3)$$

4.3.2.4. Consommation totale d'énergie (TEC)

La consommation totale d'énergie des équipements et machines-outils Mj pendant le tième intervalle est causée par trois parties: les tâches de traitement, le temps d'inactivité et la configuration, qui peut être calculée comme suit:

Consommation d'énergie de la machine M_j pendant le tième intervalle.

$$TEC_{t,j} = \sum_{k=1}^{n}(PEC_{t,j,k} + IEC_{t,j,k} + SEC_{t,j,k}) \quad ; \forall t, k, j \tag{4.1.4}$$

4.3.3. Modélisation du problème $\mathbf{Fm|nr-CIV|_{C_{max},TEC}}$

Dans ce modèle, la stratégie PM est basée sur l'exécution plutôt que sur le temps.

L'âge de la machine augmente avec les tâches de traitement et ne change pas lorsque la machine est inactive. Après la maintenance, l'âge de la machine devient 0. Les contraintes d'indisponibilité peuvent être représentées par le fait que l'âge de la machine doit être inférieur à TBF_j à tout moment de l'horizon d'ordonnancement. En attendant, le responsable doit déterminer les heures de début des maintenances.

- Dans une période PM, le temps de travail effectif de la machine ne peut pas être supérieur à un seuil TBF_j.
- L'âge de la machine est défini ici pour expliquer la contrainte PM.
- L'âge de la machine M_j est augmenté TBF_j après le traitement de l'opération $O_{i,j}$.
- Par conséquent, l'âge de la machine ne peut dépasser TBF_j à tout moment dépasser pour chaque machine selon la contrainte PM.

Le modèle relatif au problème de programmation en nombres entiers mixtes (MIP) peut finalement être établi comme suit:

Minimiser $C_{max} = C_{n,m}$ (4.1.5)

Minmiser $TEC = \sum_{k=1}^{n}\sum_{s=1}^{L_j} TEC_{t,j}$ (4.1.6)

Les objectifs des équations (4.1.5) et (4.1.6) sont deux types de réflexions et deux sortes de considérations qui illustrent le compromis entre deux aspects du conflit.

Sous les contraintes suivantes :

$$\sum_{k=1}^{n}\sum_{s=1}^{L_j} x_{i,j,k,s} = 1 \quad ; \forall i, j \tag{4.1.7}$$

La contrainte de l'équation (4.1.7) garantit que la tâche doit être située en une position de chaque machine et ne peut être traitée qu'à une seule vitesse.

$$\sum_{i=1}^{n}\sum_{s=1}^{L_j} x_{i,j,k,s} = 1 \quad ; \forall k, j \tag{4.1.8}$$

La contrainte de l'équation (4.1.8) garantit qu'une position de chaque machine ne peut être occupée que par une seule tâche.

$$\sum_{s=1}^{L_j} x_{i,j,k,s} = \sum_{s=1}^{L_j} x_{i,h,k,s} \quad ; \forall j, h \in M; \ \forall i, k \tag{4.1.9}$$

La contrainte de l'équation (4.1. 9) garantit que toutes les séquences des tâches sur les différentes machines sont identiques.

$$T_{k,j} = \sum_{i=1}^{n}\sum_{S=1}^{L_j} x_{i,j,k,s} \cdot \frac{w_{i,j}}{V_{js}} \quad ; \forall k, j \tag{4.1.10}$$

$$P_{k,j}^{Processing} = \sum_{i=1}^{n} \sum_{S=1}^{L_j} x_{i,j,k,s} \cdot e_{js} \quad ;\forall k, j \quad (4.1.11)$$

Les contraintes des équations (4.1.10) et (4.1.11)spécifient le temps de traitement réel et la demande de puissance réelle de l'opération $O_{k,j}$.

$$C_{k,j} = S_{k,j} + T_{k,j} \quad ; \forall j, k \quad (4.1.12)$$

La contrainte de l'équation (4.1.12) illustre la relation entre le début et la fin de $O_{k,j}$.

$$S_{k,j} \geq C_{k,j-1} \quad ; \forall j, k \quad (4.1.13)$$

La contrainte de l'équation (4.1.13) garantit qu'une tâche ne peut être commencée qu'après avoir été terminée sur la dernière machine.

$$S_{k,j} \geq C_{k-1,j} + PM_j \cdot y_{k,j} \quad ; \forall j, k \quad (4.1.14)$$

La contrainte (4.1.14) garantit que l'opération $O_{k,j}$ ne doit pas commencer avant la somme de l'heure de fin du job précédent immédiat dans Mj et du temps de maintenance possible.

$$a_{k,j} = b_{k,j} + T_{k,j} \quad ; \forall k , \forall j \quad (4.1.15)$$

$$b_{k+1,j} = a_{k,j} (1 - Y_{k+1,j}) \quad ; \forall j , k \leq n \quad (4.1.16)$$

Les contraintes (4.1.15) et (4.1.16) spécifient l'âge des machines avant et après chaque opération $O_{k,j}$, respectivement.

$$a_{k,j} \leq TBF_j \quad ; \forall k , \forall j \quad (4.1.17)$$

La contrainte (4.1.17) garantit que le temps de traitement continu des machines ne sera pas supérieur à TBF_j.

$$y_{k,j} \leq z_{k,j} \quad ; \forall k , \forall j \quad (4.1.18)$$

La contrainte de l'équation (4.1.18) signifie qu'un PM ne peut être traité que lorsque la machine est éteinte (hors service).

$$z_{1,j} = 1 \quad ; \forall j \quad (5.19)$$

La contrainte de l'équation (4.1.19) implique que chaque machine doit être allumée pour recommencer le traitement des tâches à nouveau.

$$\sum_{t=1}^{T} z_{t,j,k} = z_{k,j} \quad ; \forall k , \forall j \quad (4.1.20)$$

$$WS_t z_{t,j,k} \leq S_{k,j} \leq [WE_t - \underline{H}] z_{t,j,k} + (1 - z_{t,j,k}) \overline{H} \; ; \forall t, k , j \quad (4.1.21)$$

Les contraintes des équations (4.1.20) et (4.1.21) impliquent que la configuration peut uniquement être située dans un intervalle s'il y a une configuration avant une opération.

$$PEC_{t,j,k} = \{\max(0, \min(C_{k,j}, WE_t) - \max(S_{k,j}, WS_t))\} P_{k,j}^{Processing} \; ; \forall t, k , j \quad (4.1.22)$$

La contrainte de l'équation (4.1.22) spécifie le chevauchement entre le temps de traitement de chaque tâche sur Mj et le tième intervalle, sur la base duquel la consommation d'énergie peut être obtenue en utilisant la demande de puissance par unité de temps.

$$\mathrm{IEC_{t,j,k}} = \left\{\max\left(0, \min\left(\mathrm{s_{k,j}}, \mathrm{WE_t}\right) - \max\left(\mathrm{C_{k-1,j}}, \mathrm{WS_t}\right)\right)\right\} \mathrm{P_j^{Standby}} (1 - \mathrm{z_{k,j}}) \; ; \; \forall \, \mathrm{t, k, j} \qquad (4.1.23)$$

La contrainte de l'équation (4.1.23) montre que, si une configuration existe pendant le temps d'inactivité entre $O_{k-1,j}$ et $O_{k,j}$, alors aucune consommation d'énergie n'a lieu pendant ce temps d'inactivité ; sinon, la consommation d'énergie pendant le temps d'inactivité doit être prise en compte.

$$\mathrm{SEC_{t,j,k}} = \mathrm{z_{t,j,k}} \, \mathrm{E_j^{ON-OFF}} \qquad ; \; \forall \, \mathrm{t, k, j} \qquad (4.1.24)$$

La contrainte de l'équation (4.1.24) spécifie la consommation d'énergie de la machine Mj pendant une configuration (setup time).

$$\mathrm{TEC_{t,j}} = \sum_{k=1}^{n} (\mathrm{PEC_{t,j,k}} + \mathrm{IEC_{t,j,k}} + \mathrm{SEC_{t,j,k}}) \qquad ; \; \forall \, \mathrm{t, k, j} \qquad (4.1.25)$$

La contrainte de l'équation (4.1.25) signifie que la consommation d'énergie de la machine Mj pendant le tième intervalle est causée par trois parties : les tâches de traitement, le temps d'inactivité et la configuration.

$$\sum_{j=1}^{m} \mathrm{TEC_{t,j}} \leq \overline{\mathrm{D}} \qquad ; \; \forall \, \mathrm{t} \qquad (4.1.26)$$

La contrainte de l'équation (4.1.26) est la contrainte de demande de pointe, qui impose la consommation moyenne d'énergie dans chaque intervalle en dessous du seuil $\overline{\mathrm{D}}$.

$\mathrm{x_{i,j,k,s}}$, $\mathrm{y_{k,j}}$, $\mathrm{z_{k,j}}$, $\mathrm{z_{t,j,k}}$ sont binaires; certaines sont des variables continues (4.1.27)

La contrainte (4.1.27) définit les variables de décisions.

4.3.4. Algorithme Génétique de tri non dominant (NSGA-II)

Les modèles mathématiques ne peuvent pas être résolus efficacement par le logiciel commercial Cplex. Une des raisons est que les contraintes sont non linéaires. En revanche, bien qu'il soit possible d'obtenir des formules linéaires en utilisant la méthode des grandes constantes et des variables 0/1 supplémentaires, de trop nombreuses contraintes et variables seraient ajoutées dans le modèle. En outre, le problème d'ordonnancement flow shop est encore très compliqué même si les facteurs liés à l'énergie sont ignorés. En 1994, [SRI, 1994] ont développé une méthode basée sur la dominance au sens de Pareto appelée NSGA. Dans cette méthode, l'évaluation de la population se fait par des évaluations partielles sur des groupes d'individus, chaque groupe i représente les éléments qui constituent la ième frontière de Pareto. L'évaluation commence par la première frontière en donnant une valeur factice de fitness et en appliquant une fonction de partage. Une fois ce groupe évalué, il sera supprimé et le processus se répète jusqu'à ce que tous les groupes aient été évalués. L'algorithme se déroule ensuite comme un algorithme génétique classique.

Le tri des solutions en différentes frontières assure d'une part une répartition plus efficace sur la frontière Pareto et par ailleurs maintient la diversité de la population. De plus, cette méthode est applicable dans des problèmes avec un nombre quelconque d'objectifs.

Cependant, la complexité de calcul et le paramétrage de la fonction de partage représentent deux inconvénients de cette méthode. Un autre problème apparait avec la méthode de tri utilisée qui conduit au ralentissement du processus de convergence de l'algorithme. En 2000, une deuxième version de NSGA (NSGA II) a été proposée par Deb [Deb, 2000]. Dans cette version, l'auteur propose quelques solutions qui limitent les principaux problèmes de la version originale. Le mécanisme de l'algorithme a été présenté par [Deb, 2000] et est illustré à la figure 4.6.

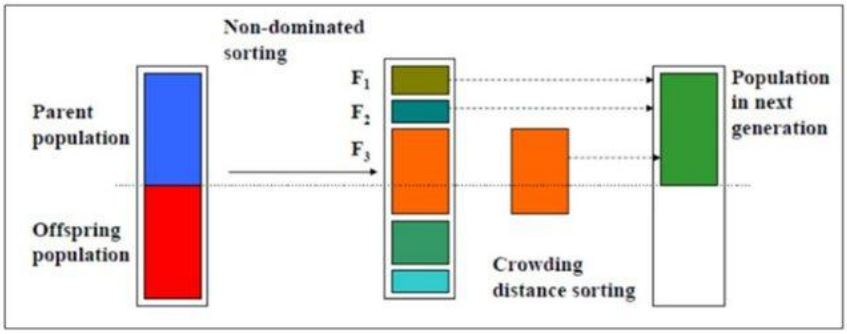

Figure 4.6 : Mécanisme de NSGA II [Deb, 2000]

Dans ce contexte, nous adoptons un algorithme génétique de tri non dominant (NSGA-II) pour résoudre ces problèmes au lieu d'utiliser des algorithmes exacts. Concernant la problématique de l'optimisation multi-objectifs consistant à minimiser les vecteurs de la fonction objectif, le modèle peut être simplement formulé comme suit : $Min\ Obj(\pi) = \{Obj_1(\pi), Obj_2(\pi), \dots, Obj_\pi(\pi)\}$ soumis à des contraintes.

Pour définir la solution optimale pour le problème d'optimisation multi-objectif, nous introduisons d'abord le concept de Pareto.

- Soit π_1 et π_2 deux solutions pour le problème donné.
- Si π_1 est pire que π_2 du point de vue de tous les objectifs, alors π_1 est dominé par π_2 , c'est-à-dire, $\pi_2 \prec \pi_1$.
- S'il n'y a pas de solution satisfaisant $\pi \prec \pi_2$, alors la solution π_2 est optimale de Pareto. L'ensemble de toutes les solutions optimales de Pareto est désigné par la frontière de Pareto.

Pour le problème à un seul objectif, le but de la résolution des modèles est de trouver la meilleure solution avec une valeur objective minimale. Pour le problème multi-objectif, le but de la résolution des modèles est de trouver la frontière de Pareto.

Dans le cas de deux solutions π_1 et π_2 à la frontière de Pareto, aucune relation de dominance n'existe entre π_1 et π_2 , à savoir que π_1 est meilleur que π_2 pour certains objectifs et que π_1 est pire que π_2 pour les autres objectifs simultanément.

Certains auteurs élaborent le modèle à partir d'une somme pondérée de tous les objectifs et utilisent l'algorithme à un seul objectif pour résoudre le modèle, ce qui permet de n'obtenir qu'une seule solution à chaque fois pour les poids définis. Nous adoptons plutôt l'algorithme d'optimisation multi-objectifs basé sur un tri non dominé pour rechercher directement la frontière de Pareto.

Les auteurs [DEB, 2002] ont conçu un algorithme évolutif multi-objectif basé sur la stratégie de tri non dominée et la distance de surpeuplement, qui est désignée par NSGA-II. Les performances d'un individu dans la population sont évaluées par le rang et la distance d'encombrement. La structure de base de la NSGA-II est similaire à celle de l'AG traditionnelle, qui consiste à résoudre un problème à un seul objectif. La différence principale réside dans la manière de faire évoluer une nouvelle population. Dans la NSGA-II, les populations parentales et les descendants sont fusionnés en un seul groupe. Ensuite, les

meilleurs individus sont sélectionnés à partir de ce groupe pour composer la nouvelle population. Vous trouverez la structure détaillée dans [DEB, 2002]. Cependant, cette structure n'est qu'un cadre de base de la NSGA-II afin de rendre la méthodologie claire et d'ignorer les procédures de tri détaillées qui calculent le rang et la distance d'encombrement. Comme indiqué dans la figure 4.7, la population évolue de l'ancienne à la nouvelle génération en fonction de la survie des plus aptes. Comme l'individu le plus apte à une plus grande probabilité de générer une progéniture, la caractéristique de cet individu sera probablement héritée par celle de sa progéniture. Ainsi, les performances de la génération g + 1 seront meilleures que celles de la génération g. Après évolution, les solutions optimales de Pareto sont obtenues à partir de la dernière génération gmax.

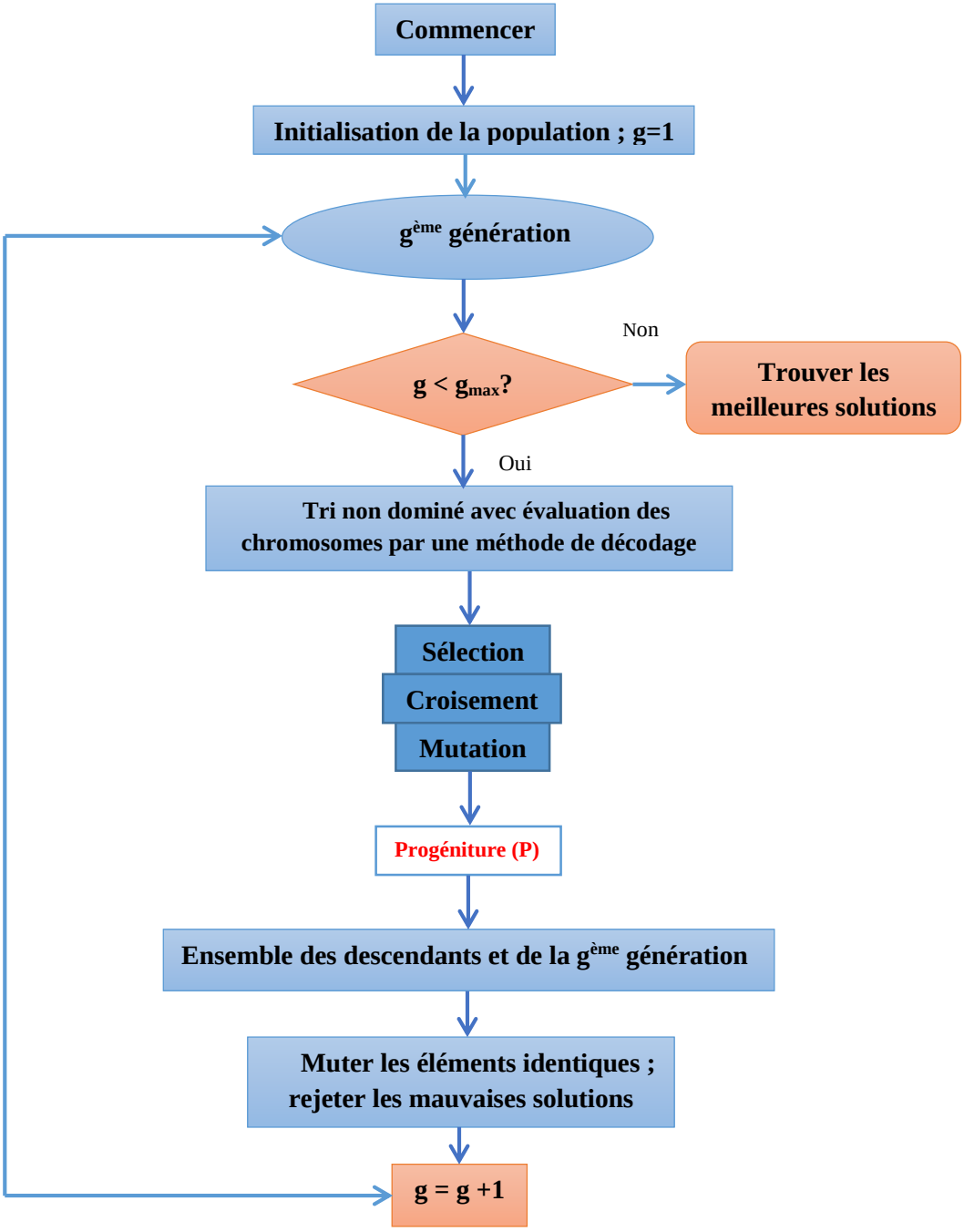

Figure 4.7 : Organigramme de l'algorithme NSGA-II

Les opérateurs génétiques particuliers de notre algorithme sont indiqués :

Représentation des chromosomes: Nous utilisons deux parties pour représenter un chromosome :

- La première partie est une chaîne d'entiers, qui montre la séquence des jobs traités. Par exemple, $\{3, 4, 2, 5, 1\}$ cela implique que le job j_3 est traité en première position.
- La deuxième partie est le niveau de vitesse sélectionné pour chaque opération sur chaque machine, qui est une matrice. Par exemple, lorsqu'il y a trois machines, $\{1, 2, 2, 1, 3;\ 2, 1, 2, 4, 1;\ 5, 3, 1, 5, 5\}$, cela implique que la première opération traitée dans la machine M_1 est avec le niveau de vitesse 1, la première opération dans la machine M_2 est avec le niveau de vitesse 2 et la première opération dans la machine M_3 est avec le niveau de vitesse 5.

L'évaluation des chromosomes : Basé sur du chromosome, l'ordonnancement principal est désormais disponible. Nous pouvons obtenir le temps de traitement réel et la consommation d'énergie pour chaque opération. Ensuite, nous devons optimiser y et z en minimisant les objectifs sans violer les contraintes. La procédure détaillée se trouve dans la section suivante. Après avoir trouvé les y et z optimaux, le makespan et la consommation d'énergie peuvent être obtenues pour le chromosome.

Si $Cmax(ch1) < Cmax(ch2)$ et $TEC(ch1) < TEC(ch2)$ alors $ch2$ est dominé par $ch1$, c'est-à-dire que $ch1$ a un meilleur rang. Sinon, deux chromosomes sont situés sur la même frontière, c'est-à-dire qu'ils ont le même rang. Pour les chromosomes sur la même frontière, la distance euclidienne entre les chromosomes doit être calculée. $ch1$ est meilleur que $ch2$ s'ils sont sur la même frontière et la distance d'encombrement obtenue basée sur la distance euclidienne de ch1 est plus grande.

La sélection :

À la même manière au traditionnel GA, il convient de calculer la valeur de fitness basée sur le fonctionnement du chromosome. Dans le cadre de cette étude, la valeur d'aptitude du chromosome est une combinaison du rang et de la distance d'encombrement. Le chromosome ayant une meilleure valeur d'aptitude est un parent dont la probabilité est plus élevée que celle des autres chromosomes. Pour réduire la pression de sélection et augmenter la diversité de la population, nous utilisons la méthode du tournoi à deux tailles. Nous sélectionnons deux chromosomes au hasard et mettons le meilleur dans la population de reproduction. Par ailleurs, tous les autres parents sont choisis selon la même méthode.

Le croisement : Nous choisissons deux parents $ch1$ et $ch2$ dans la population d'accouplement et nous effectuons la procédure de croisement avec une probabilité de $0{,}8$.

Pour la première partie du chromosome, nous utilisons la méthode de croisement par ordre. Une chaîne de n binaires est générée de manière stochastique. Ainsi, une chaîne des caractères $\{1, 0, 1, 0, 0\}$ est générée lorsque $n = 5$.

- Tout d'abord, le gène de la progéniture correspondant au "1" de la chaîne est copié à partir du parent ch1.
- Ensuite, ces entiers sont supprimés du parent ch2.
- Le gène de la progéniture correspondant au "0" de la chaîne est copié du parent ch2 en séquence.

Pour la deuxième partie du chromosome, un croisement partiel est adopté. Pour le niveau de vitesse de chaque machine, le front de la progéniture est le même avec le front du parent ch1 et celui de la progéniture est le même avec l'arrière du parent $ch2$.

La mutation : Nous choisissons une progéniture ch et effectuons la procédure de mutation avec une probabilité de $0{,}05$.

Pour la première partie du chromosome, nous utilisons la méthode de mutation par inversion. Tout d'abord, deux gènes g_1 et g_2 sont sélectionnés au hasard dans la chaîne. Ensuite, nous inversons les nombres des gènes du chromosome par la méthode de la plage de mutation. $[g_1, g_2]$ La deuxième partie du chromosome, le gène est choisi au hasard. Puis, l'opérateur modifie le niveau de vitesse correspondant de manière aléatoire.

La gestion de la population : La population est composée de 200 individus.

Dans la population initiale, 198 individus sont créés de manière aléatoire et deux solutions sont construites de manière heuristique comme suit.

- La première solution correspond au mode à faible vitesse (basse vitesse), ce qui signifie que les niveaux de vitesse de toutes les machines sont fixés au niveau le plus bas pour le traitement de tous les travaux.
- La deuxième solution correspond au mode haute vitesse, ce qui signifie que les niveaux de vitesse de toutes les machines sont fixés au niveau le plus élevé pour le traitement de tous les travaux. Après sélection, croisement et mutation, nous obtenons 200 osprings.

Ensuite, 200 osprings et 200 individus de l'ancienne population sont ajoutés en un seul pool. Pour conserver une bonne diversité de la population, nous vérifions le pool pour trouver les doublons et utilisons la méthode de mutation pour les changer.

Enfin, nous sélectionnons les 200 meilleurs individus du pool pour composer la nouvelle population. L'évolution s'arrête lorsque le nombre d'itérations g atteint la limite maximale gmax.

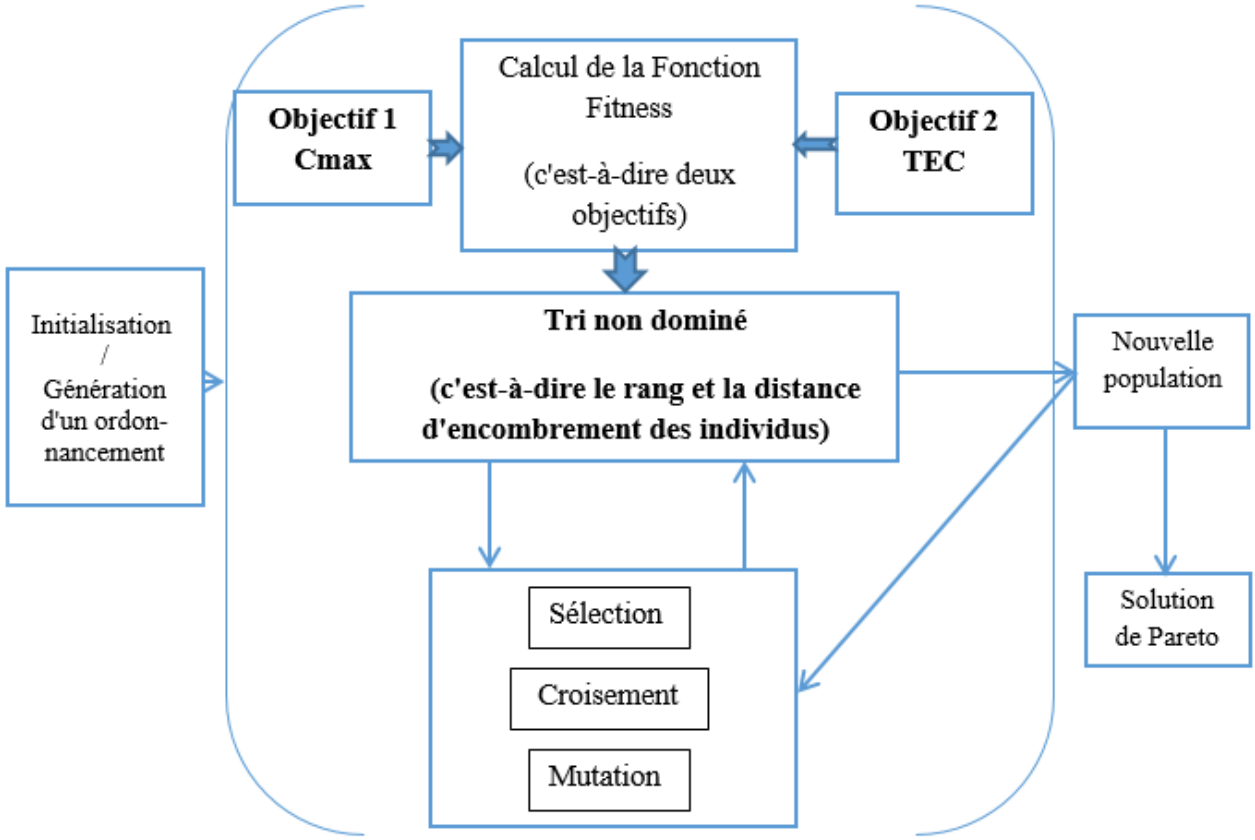

Figure 4.8 : Organigramme du problème utilisant l'algorithme NSGA-II

Le pseudo-code de l'algorithme NSGA-II est donné dans l'algorithme 4.1 qui figure ci-après.

Algorithme 4.1 : Le pseudo-code de l'algorithme NSGA-II sous contraintes des techniques SMT, PDT et SLT.

Etape 1. Soit $\text{age}_j = 0$; $\text{Off}_j = 0$; soit $t = 1$.

Etape 2. Soit $D_{At} = 0$.

Etape 3. Calculez la consommation d'énergie de J_{tj} ∀ j dans le tième intervalle, qui est, $D(J_{tj})$. Ensuite nous avons $D_{At} = \sum_{j=1}^{m} D(J_{tj})$. Si $D_{At} > \overline{D}$, puis modifiez le niveau de vitesse de J_{tj}et mettez à jour D_{At} . Calculez le temps de réalisation de J_{tj} pour chaque machine, qui est $f(J_{tj})$.

Etape 4. Soit $j = 1$.

Etape 5. Si $j > m$, puis définissez $t = t + 1$, passez à l'étape 2. Sinon, si $f(J_{tj}) > WE_t$, défini $j = j + 1$, passez à l'étape 6. Sinon, passez à l'étape 6.

Etape 6. Si $D_{At} \geq \overline{D}$, puis définissez $\text{Off}_j = 0$, $j = j + 1$ passez à l'étape 5; sinon, passez à l'étape 7.

Etape 7. Soit J_{tjs} le successeur de J_{tj}. Soit $w(J_{tjs})$le temps de traitement de base de J_{tjs}. Si $(J_{tjs}) + \text{age}_j > \text{TBF}_j$, puis réglez $\text{Off}_j = 0$ et exécutez un PM pour régler $\text{age}_j = 0$.

Etape 8. Recherchez la première heure de début autorisée de J_{tjs}, qui est $s(J_{tjs})$. If $s(J_{tjs}) > WE_t$, puis passez à l'étape 9; sinon, passez à l'étape 11.

Etape 9. Si $\text{Off}_j = 0$, puis réglez $j = j + 1$, passez à l'étape 5; sinon, passez à l'étape 10.

Etape 10. Calculez la consommation d'énergie du temps d'inactivité restant de cet intervalle, c'est-à-dire. Idle_t. Si $\text{Idle}_t + D_{At} \leq \overline{D}$, puis définissez $D_{At} = D_{At} + \text{Idle}_t$, $j = j + 1$, passez à l'étape 5. Sinon, définissez $\text{Off}_j = 0, j = j + 1$, passez à l'étape 5.

Etape 11. Si $\text{Off}_j = 0$, alors essayez de démarrer le travail J_{tjs} le plus tôt possible, mettez à jour D_{At} , passez à l'étape 12; sinon, passez à l'étape 14.

Etape 12. Si la consommation en veille entre J_{tjs} et J_{tj} est inférieure à SEC_j, réglez $\text{Off}_j = 0$. Si la durée de ce temps d'inactivité est supérieure à PM_j et $\text{Off}_j = 0$, définissez $\text{age}_j = 0$. Passez à l'étape 13.

Etape 13. Si l'heure de fin de J_{tjs} est inférieure à WE_t, alors définissez $\text{age}_j = \text{age}_j + w(J_{tjs})$, considérez l'opération suivante sur cette machine, passez à l'étape 7. Sinon, cette tâche sera une tâche commencée dans le tième intervalle et terminée dans les intervalles suivants, définissez $j = j + 1$, passez à l'étape 5.

Etape 14. Si $SEC_j + D_{At} \leq \overline{D}$, puis définissez $\text{Off}_j = 1$, $D_{At} = D_{At} + SEC_j$, passez à l'étape 11. Sinon, définissez $j = j + 1$, passez à l'étape 5.

4.3.5. Résultats numériques et analyses

4.3.5.1.Validation de l'algorithme

La nécessité de faire appel à un logiciel d'optimisation industrielle est née du fait que pour trouver la séquence optimale des systèmes étudiés et répondre efficacement à notre problématique,

L'algorithme a été programmé dans la plate-forme Python et le programme a été exécuté sur un ordinateur portable Hp avec un processeur Intel Core i5 2,50 GHz et 8 Go de RAM.

Les paramètres du problème sont définis comme suit :

La longueur de l'intervalle, δ, est égale à 15 min. Les temps de traitement de base des opérations sont générés uniformément à partir d'un intervalle [10 min, 60 min]. La durée de la période PM est égale à 24 h. Pour chaque machine, il existe six niveaux de vitesse. En conséquence, la vitesse réglée est $\{1, \frac{1}{1.9}, \frac{1}{0.8}, \frac{1}{0.7}, \frac{1}{0.6}, 2\}$ pour différents niveaux et l'ensemble de la demande de puissance est {1, 1.2, 1.5, 1.8, 2.2, 2.8}.

Ensuite, la consommation d'énergie par unité de temps (1 min) est égale à 1 unité si la machine traite un travail avec un niveau de vitesse 1. La consommation d'énergie par unité de temps est de 0,5 unité lorsque la machine est au repos. La consommation d'énergie causée par une configuration est égale à 10 unités.

La ligne de production est composée de cinq machines. Le nombre de travaux n est défini sur $\{50, 100, 200\}$. La durée de la maintenance est définie sur $\{50\ min, 150\ min, 300\ min\}$. Le seuil de demande de pointe $\overline{D}$ est réglé sur $\{8, 9, 10, 11, 12\}$. En conséquence, la limite de consommation d'énergie dans un intervalle est égale à {120, 135, 150, 165, 180}. Ainsi, il existe des scénarios.

Pour chaque scénario, trois instances sont générées de manière aléatoire. Pour la taille de la population, une plus grande taille apporte généralement un plus grand potentiel pour trouver de bonnes solutions. Cependant, une taille plus grande signifie plus de temps de calcul. Compte tenu du nombre d'emplois, la taille est fixée à 200. Habituellement, une forte probabilité de croisement est recommandée pour augmenter la capacité de recherche de GA; une faible probabilité de mutation est recommandée pour garantir la stabilité de GA. Après calibrage sur un petit ensemble d'instances aléatoires pour évaluer les performances de différentes probabilités, la probabilité de croisement est fixée à $P_c = 0{,}8$ et la probabilité de mutation est fixée à $P_c = 0{,}05$.

Concernant la génération maximale, des solutions meilleures peuvent être trouvées avec l'évolution de la population et plus de temps de calcul est nécessaire pour une limite maximale plus élevée. À la 50ème génération, 99 solutions sont obtenues à la frontière. A la 100ème génération, 156 solutions sont obtenues à la frontière. A la 1000ème génération, 200 solutions sont obtenues à la frontière, ce qui signifie que toutes les solutions de la population sont situées à la frontière. La frontière obtenue à la 3000ème génération est très proche de celle de la 1000ème génération, ce qui montre la convergence de notre algorithme. Ainsi, nous fixons le maximum de la génération 3000.

4.3.5.2. Impact des périodes de la maintenance : PM

Les responsables de l'usine de fabrication doivent choisir une solution appropriée en fonction de la date limite de production. Comme la période de la maintenance PM est un facteur important dans ce problème, nous montrons son impact sur les résultats dans cette sous-section.

Les figure 4.9, 4.10 et 4.11 montrent la différence entre les solutions obtenues par NSGA-II pour diverses périodes de maintenance. Il est évident que les solutions sont meilleures lorsque le temps de maintenance est plus court. Les consommations d'énergie minimales sont les mêmes dans les

différentes situations, ce qui signifie qu'il y a la même limite ultime pour la réduction de la consommation d'énergie.

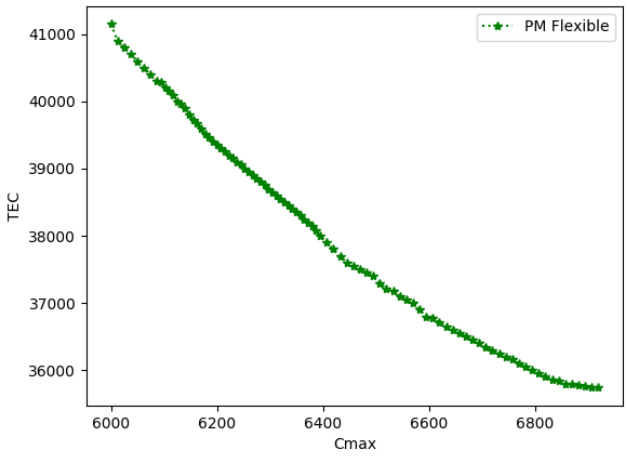

Figure 4.9 : Analyse des solutions dans le cadre des PM=50

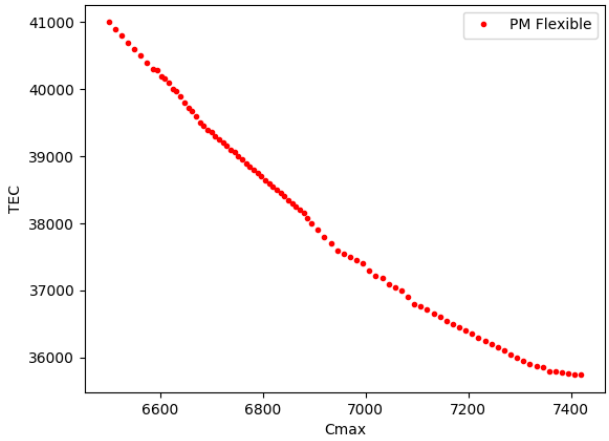

Figure 4.10 : Analyse des solutions dans le cadre des PM=150

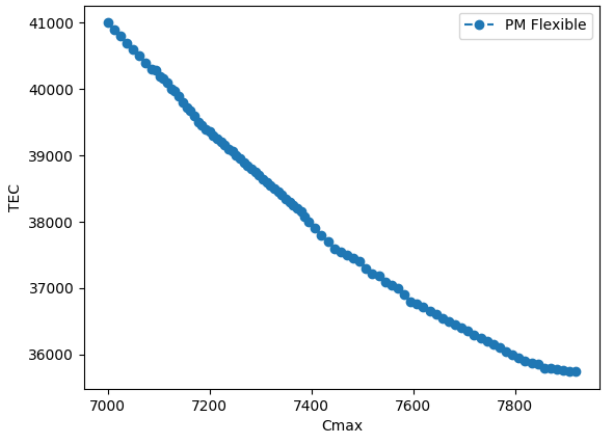

Figure 4.11 : Analyse des solutions dans le cadre des PM=300

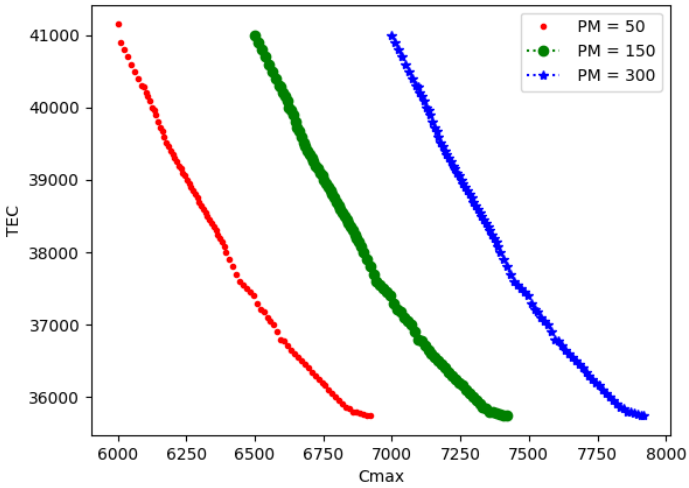

Figure 4.12 : Comparaison des solutions sous différentes périodes de maintenance

Par ailleurs, la différence entre les longueurs des trois lignes est très faible. Le modèle ci-dessus n'est pas seulement valable pour cette instance aléatoire, mais aussi pour toutes les instances. Les résultats numériques de tableau 4.4 et le tableau 4.5 illustrent cette situation.
Pour découvrir le modèle dans tous les cas, les résultats numériques sont enregistrés dans le tableau 4.4 et le tableau 4.5.

- La «solution de gauche» est la solution extrême située à l'extrémité gauche de la ligne, qui désigne la solution avec le plus petit makespan.
- La «solution de droite» est la solution extrême située à l'extrémité droite de la ligne, qui désigne la solution avec la plus faible consommation d'énergie.

La figure 4.12 montre la différence entre les solutions obtenues par NSGA-II sous différentes PM.

- Il est évident que les solutions sont meilleures lorsque le temps de maintenance est plus court.
- Les consommations d'énergie minimales sont les mêmes dans différentes situations, ce qui signifie qu'il y a la même limite ultime pour la réduction de la consommation d'énergie.
- Durant cette période, la différence entre les longueurs des trois lignes est très faible, comme illustré sur les figures 4.9, 4.10 et 4.11.
- Le modèle ci-dessus est valable non seulement pour cette instance aléatoire, mais également pour toutes les instances.

Les résultats numériques des tableaux 4.4 et 4.5 permettent de les prouver.

Tableau 4.4 : Résultats numériques relatifs à la solution avec le petit makespan

PM	**n**	"Solution à faible makespan "					
		Peak=120		Peak=150		Peak=180	
		C_{max}	**TEC**	**C_{max}**	**TEC**	**C_{max}**	**TEC**
50	50	1442	10116	1340	10419	1130	11369
	100	2901	20094	2661	20882	2210	23044
	200	5962	41420	5465	43563	4682	45600
150	50	1563	10132	1335	11113	1223	11492
	100	**3109**	**20283**	2899	21033	2467	22576
	200	6501	40998	5977	42461	4882	47653
300	50	1692	10121	1432	11257	1342	11431
	100	3372	20129	3042	21378	2710	22842
	200	6914	40977	5824	46179	5292	48382

Tableau 4.5 : Résultats numériques relatifs à la solution avec la plus faible consommation d'énergie

PM	n	"Solution à faible consommation d'énergie "					
		Peak=120		Peak=150		Peak=180	
		C_{max}	TEC	C_{max}	TEC	C_{max}	TEC
50	50	1907	8552	1914	8542	1938	8542
	100	3726	17221	3756	17243	3719	17241
	200	7398	35100	7406	35092	7407	35083
150	50	2034	8556	2034	8545	2034	8562
	100	**4032**	**17123**	4041	17157	4056	17172
	200	7891	35046	7857	35059	7863	35071
300	50	2157	8547	2143	8565	2142	8568
	100	4326	17112	4423	17086	4305	17132
	200	8393	35024	8389	35062	8459	35046

Dans le tableau 4.4, le makespan pour la "solution de gauche" est de 3109 avec une consommation d'énergie de 20 283 ; quand PM= 150, n = 100 et Peak = 120.

Selon le même scénario présenté dans le tableau 4.6, le makespan de la " solution de droite" est de 4032 pour une consommation d'énergie de 17123 ;

- Pour la " solution de gauche ", les deux objectifs sont (3109, 20 283).
- Pour la " solution de droite ", les deux objectifs sont (4032, 17123).

Les profils de consommation d'énergie détaillés de ces solutions sont présentés dans les figures 4.13 et 4.14. Dans les deux figures, nous pouvons apprécier que la majeure partie de la consommation soit due au traitement des tâches, indépendamment de la solution considérée.

En comparant les figures 4.13 et 4.14, on constate que la différence de consommation d'énergie entre les intervalles est assez importante pour la «solution de gauche». Cependant, la consommation d'énergie est égale à **75** dans de nombreux intervalles pour la «solution de droite». La raison en est que chaque machine traite les travaux avec le niveau de vitesse 1 la plupart du temps. Ensuite, cinq machines consomment 5 unités par unité de temps, ce qui donne des unités pendant un intervalle $5 \times 15 = 75$.

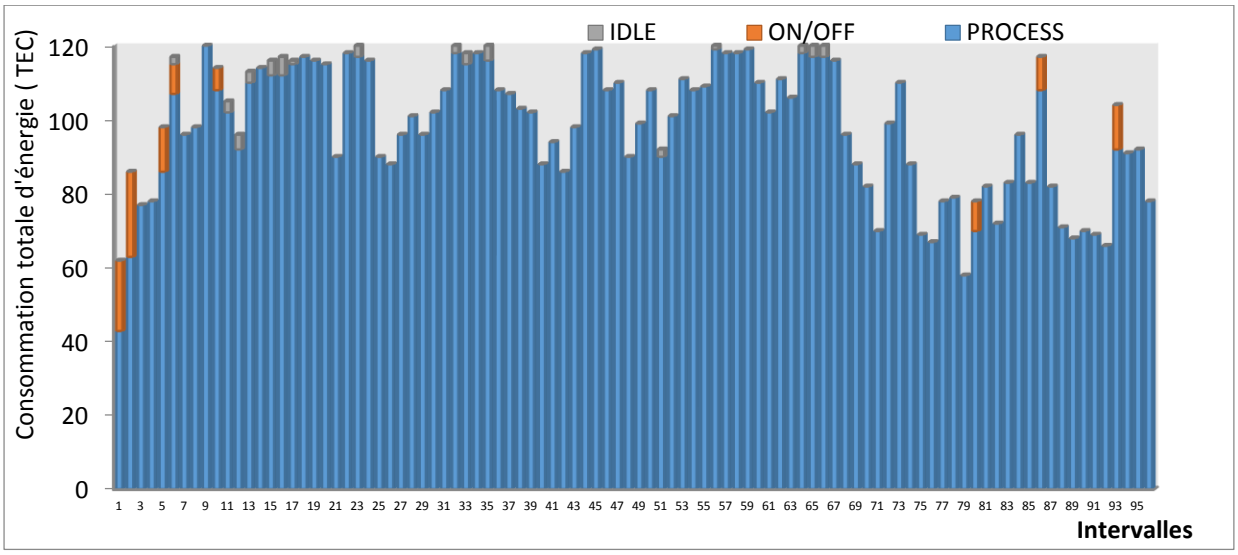

Figure 4.13 : Profils de consommation d' énergie à plus petit makespan

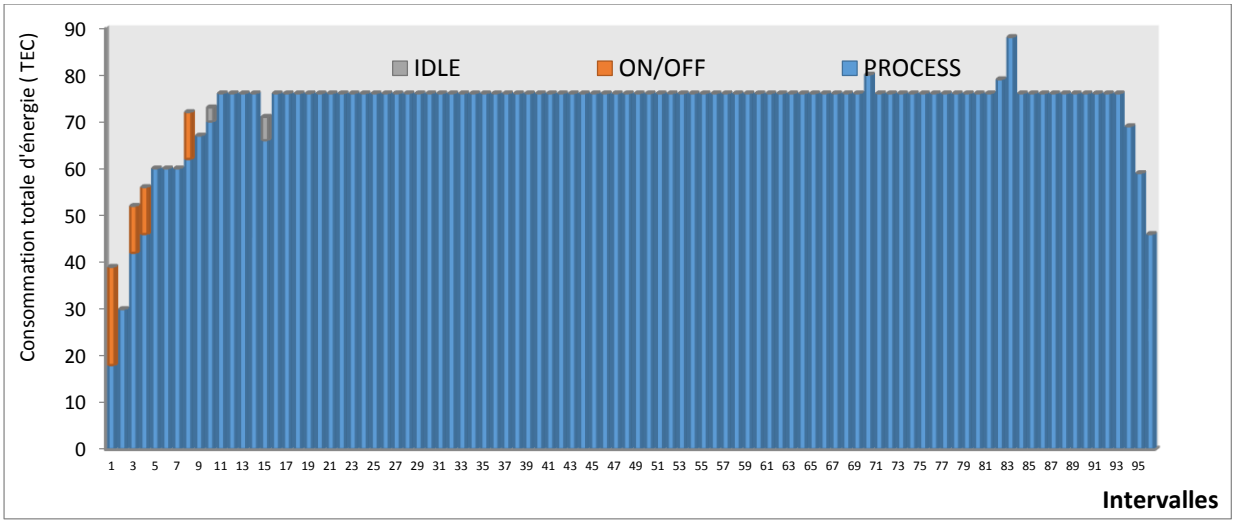

Figure 4.14 : Profils de consommation d'énergie à faible consommation d'énergie

4.3.6. Discussions

Le modèle établi dans cette étude intègre l'ordonnancement de la production et de la maintenance sous contraintes de demande de pointe, qui prend également en compte la sélection de marche / arrêt et de vitesse de la machine.

Dans le tableau 1.1, nous pouvons constater que le modèle est unique dans la littérature. Bien qu'il soit impossible de comparer directement nos résultats numériques avec les résultats d'autres références du point de vue de la quantité, les principales conclusions peuvent être comparées qualitativement pour impliquer les connaissances managériales pour les praticiens de l'industrie réelle. Il existe un lien entre la consommation de la machine inactive et la consommation de configuration, c'est-à-dire que si la durée du temps d'inactivité est plus longue que, la machine doit être arrêtée $\tau = \text{setup}/\gamma$.

Par conséquent, la disposition avec de nombreux petits intervalles avec un temps plus court n'est pas bonne; l'arrangement avec quelques grands intervalles de longueur τ est encouragé.

La suggestion ci-dessus est très utile lorsque le gestionnaire souhaite économiser le coût de l'énergie. De plus, nous constatons que l'intervalle de temps d'inactivité est une bonne opportunité pour effectuer

des MP.

- Si la durée d'une maintenance est plus courte que τ, une PM peut être effectuée ici pour améliorer la fiabilité de la machine puisqu'elle a déjà été arrêtée.
- Si la durée d'une maintenance est plus longue que τ, nous suggérons au responsable d'organiser la production pour générer des intervalles d'inactivité dont la durée est égale au temps de maintenance plutôt que.

Selon les résultats de la recherche sur la sélection des niveaux de vitesse des machines pour ajuster le compromis entre la durée de vie et la consommation d'énergie dans la littérature, il est suggéré de définir le niveau le plus élevé pour chaque machine afin de terminer les travaux le plus rapidement possible.

Cependant, cela entraînera une forte demande de puissance du système de production.

- Il montre au gestionnaire que le makespan ne peut pas être constamment diminué en raison de la contrainte de pointe de demande.
- De plus, plus la limite de pic est élevée, plus la durée de vie peut être réduite.
- Cette constatation suggère au gestionnaire de tenir compte de la limite de pointe lorsqu'il évalue si une ligne de production peut terminer une commande à temps ou non.
- Selon les résultats de cet article, les niveaux de vitesse des différentes machines doivent être adaptés pour garantir que la demande de puissance maximale est inférieure à la limite.
- Certaines machines, dans lesquelles le temps de traitement de base du travail est plus long, devraient fonctionner avec un niveau de vitesse élevé.
- Les autres machines, dans lesquelles le temps de traitement de base du travail est plus court, devraient fonctionner à faible vitesse. Ensuite, la makespan peut être réduite autant que possible sous la condition avec une bonne performance dans l'aspect énergétique.

Cette recherche est étroitement liée à l'application pratique en installation industrielle.

Les principales implications pratiques peuvent être formulées à partir de quatre points :

1. Premièrement, le problème de la gestion des opérations de l'usine de fabrication est un sujet complexe associé à différents aspects. L'efficacité de la recherche sera réduite si les chercheurs se concentrent uniquement sur l'étude théorique dans un seul aspect. La seule façon de combler le fossé entre la théorie et la réalité est d'étudier le problème de l'intégration.
2. Deuxièmement, le directeur de l'usine peut réduire le makespan si une plus grande consommation d'énergie peut être acceptée par le directeur. Cependant, le makespan ne peut pas être constamment diminué en raison de la contrainte de pointe de demande.
3. Troisièmement, la durée de la maintenance affectera fortement le makespan et n'affectera pas la consommation totale d'énergie. Les positions des PM doivent être déterminées en tenant compte de la décision de marche / arrêt des machines.
4. Quatrièmement, bien que la consommation totale d'énergie soit due à trois éléments, les travaux de transformation occupent la majeure partie de la consommation d'énergie.

Ainsi, le directeur de l'usine doit prêter attention aux travaux de traitement au lieu du temps d'inactivité et de la consommation d'installation.

Il y a plusieurs limites qui peuvent être trouvées dans l'hypothèse du problème.

Tout d'abord, nous supposons que la PM périodique élimine les pannes inattendues de la machine et que l'environnement de l'usine est déterministe.

Par conséquent, nous établissons un modèle mathématique déterministe dans cette étude.

À l'avenir, l'impact des facteurs incertains peut être pris en compte, par exemple les pannes imprévues des machines, les commandes urgentes et la panne d'électricité temporaire. Deuxièmement, nous utilisons la consommation totale d'énergie comme objectif énergétique. Par conséquent, il n'est pas nécessaire d'insérer des temps d'inactivité dans le programme pour ajuster son modèle de consommation.

Dans la deuxième partie de ce chapitre, le tarif horaire, qui incite les utilisateurs d'énergie à déplacer la demande d'électricité des heures de pointe aux heures de vallée, peut être envisagé. Troisièmement, nous supposons qu'il n'y a qu'une seule machine à chaque étape du flow shop. Par conséquent, le problème d'allocation des machines est évité dans cette étude.

À l'avenir, des machines parallèles à chaque étape pourront être envisagées pour composer le flow shop hybride. De plus, une seule ressource énergétique est considérée dans cet article. Les ressources énergétiques renouvelables telles que l'énergie solaire et l'énergie éolienne sont encouragées à être des alternatives aux combustibles fossiles, car les ressources renouvelables sont plus propres et plus vertes. À l'avenir, il est également très intéressant d'étudier la manière de répondre à la demande en énergie d'une centrale en utilisant le système de micro-réseau.

4.4. Formulation mathématique mono-objectif de la 2ème problématique du modèle à machine parallèles : Hausse des coûts au sein de l'atelier de fabrication des coussins en mousse

Au Maroc, les entreprises manufacturières paient des tarifs d'électricité qui sont stratifiés selon l'heure de la journée (c.-à-d. les heures de pointe, les heures pleines, les heures creuses). Dans le concept émergent de réseau intelligent (Smart grid), les industries peuvent en revanche être amenées à payer des frais d'électricité en temps réel pour utiliser l'énergie de la manière la plus efficace possible. De toute évidence, ces entreprises ont clairement intérêt à économiser l'énergie et à réduire leurs coûts énergétiques, ainsi qu'à protéger l'environnement, tandis que le développement durable constitue un défi considérable pour eux.
De plus, la question de l'ordonnancement, qui intègre les contraintes énergétiques et environnementales, reste une question assez limitée qui n'a pas encore été concrétisée. À cet égard, notre étude vise à faire progresser le concept d'industrialisation en adoptant une approche plus intelligente et plus ciblée des questions écologiques et environnementales. Notre présence au sein de l'entreprise Martur Fompak INTERNATIONAL répondait au besoin exprimé en vue de résoudre la problématique majeure dans l'entreprise ; à savoir un coût élevé en vigueur dans l'atelier de fabrication des coussins en mousse.
Martur fait partie d'un groupe d'entreprises fournissant à l'industrie automobile des composants de haute qualité pour l'intérieur des voitures «Sièges d'automobiles». La conception et le développement des produits, ainsi que l'élaboration de solutions innovantes, sont des facteurs clés pour notre groupe. Ce groupe d'entreprises se préoccupe du récent réchauffement climatique, de l'épuisement des combustibles fossiles et de la dégradation de l'environnement. Conformément à l'adoption de notre projet, il est très important de réduire les émissions de dioxyde de carbone et d'augmenter l'efficacité énergétique.
L'atelier de production de mousse de polyuréthane PU injectée pour les coussins des sièges d'automobile possède des machines qui remplissent la même fonction mais qui ont des capacités ou des aptitudes différentes (notamment des taux de consommation d'énergie par heure différents).



Figure 4.15 : Machines de production de mousse de siège en polyuréthane, haute qualité, avec injection

L'atelier possède plusieurs tâches indépendantes avec la même date d'échéance. En outre, ses machines ont trois taux différents (charge de pointe, charge pleines et charge creuse) selon l'heure de la journée (c.-à-d. Heures de pointe, Heures pleines, Heures creuses).

D'après le site officiel de l'Office National de l'Électricité et de l'Eau Potable, le Tarif Général (MT) est constitué d'une prime fixe pour la facturation de la puissance souscrite et un prix de kWh par poste horaire.

Les tarifs sont exprimés en dirhams TVA comprise (TVA est de 14%).

Le prix de l'électricité dépend principalement de la consommation par poste horaire. Une bonne gestion des horaires de consommation vous permettra par conséquent une meilleure maîtrise de votre facture d'électricité.

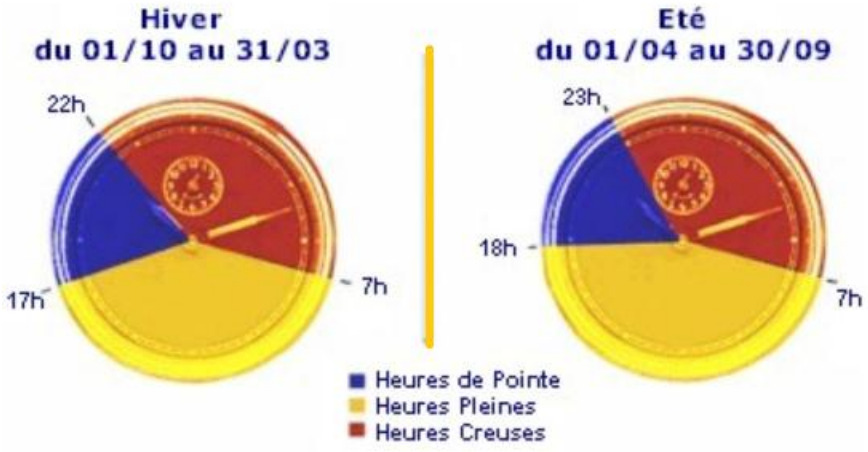

Figure 4.16 : Saisons et postes horaires

Le tarif de base de l'énergie vendue sera composé des deux éléments suivants indiqués dans le tableau ci-dessous du site de la société Amendis en charge de la gestion déléguée des services d'assainissement liquide (eaux usées et eaux de pluie), de distribution d'eau potable et d'électricité dans les régions de Tanger et de Tétouan :

- Une redevance annuelle par KVA appliquée à la puissance, dite « Redevances fixes ».
- Une redevance par KWH consommé dite « Redevance de consommation » variable selon que la consommation a lieu en ''H.P'', en ''H.pl'' ou en ''H.C''.

Tableau 4.6 : Redevances du tarif HT général (Amendis Tanger)

	Hors Zone Franche	Zone Franche
Heures Pleines	0.94854	0.86150
Heures de pointes	1.25893	1.13647
Heures creuses	0.73811	0.68273

Pour notre cas de figure, l'entreprise MARTURFOMPAK INTERNATIONAL est située dans la zone franche de Tanger au Maroc. Cette étude de cas a été menée en Mars 2020 et, à cet égard, le graphique du prix quotidien de l'électricité en l'hiver a été illustré comme le montre la figure ci-dessous.

De ce fait, les valeurs des redevances du tarif HT général sont les suivantes :

- Redevance de puissance souscrite : 503.92 DH/KVA/AN.
- Redevance de consommation :
  - En Heures Pleines (H.pl) 0.86150 DH/KWh.
  - En Heures de pointes (H.P) 1.13647 DH/KWh.
  - En Heures Creuses (H.C) 0.68273 DH/KWh.

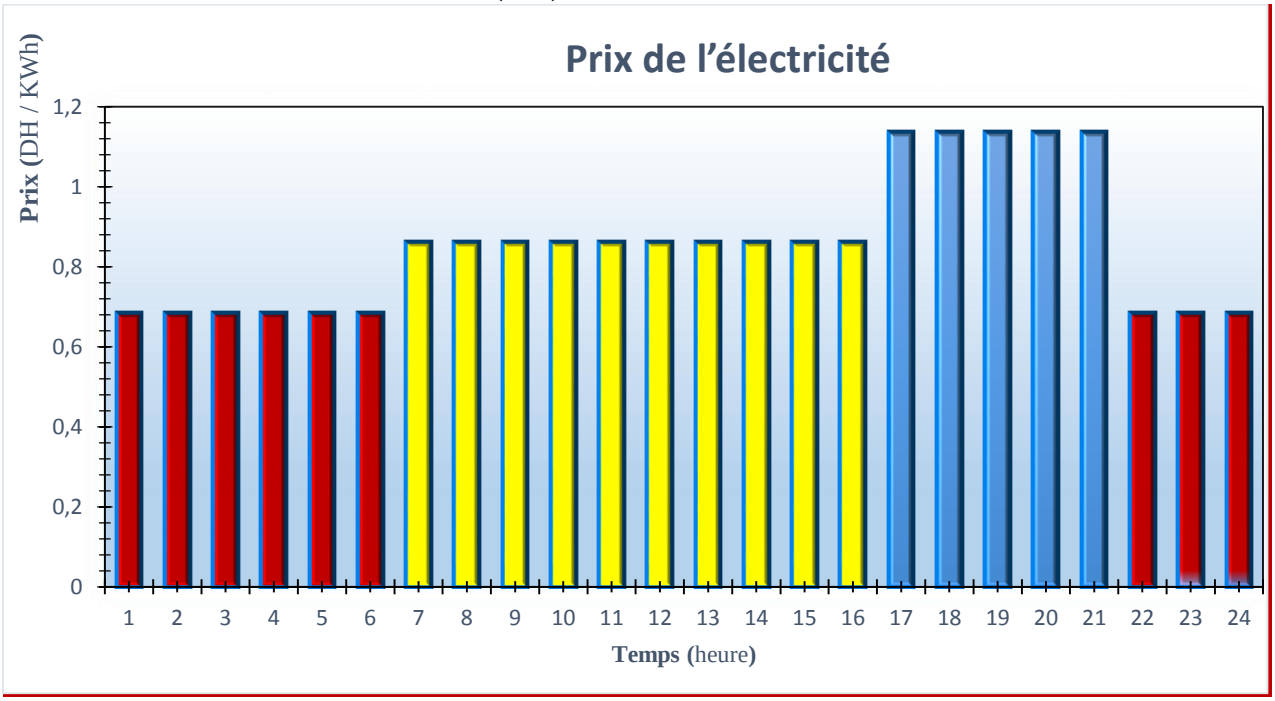

Figure 4.17 : Prix quotidien de l'électricité en l'hiver

L'atelier dispose ainsi des périodes d'inactivité (ou des tâches vides), qui sont indispensables pour éviter des coûts d'électricité élevés. Nous partons du principe que les temps en veille n'entraînent aucun coût d'électricité. Cependant, une augmentation de la durée de fonctionnement (ou du nombre total d'heures de fonctionnement) entraîne des coûts excessifs en heures supplémentaires.

Par conséquent, l'objectif est de minimiser la somme de la durée de fonctionnement multipliée par le coût de la pénalité (ou le coût du temps supplémentaire) et le coût total de l'électricité.

Les hypothèses de notre problème sont les suivantes :

- Système composé des machines parallèles indépendantes ;
- N jobs indépendants et en une seule opération ;
- Le temps d'inactivité est autorisé ;
- Temps de traitement et dates d'échéance prédéfinis ;
- Aucune interruption après le début de l'emploi (non préemption) ;
- Ordonnancement de la production sur un jour (24 heures).

4.4.1. Intégration de la nouvelle technique d'économie d'énergie : DRT

Le développement de l'informatique a introduit le concept de smart grid, qui permet aux consommateurs de participer activement à une forme de communication bidirectionnelle. Le smart grid fournit l'électricité des fournisseurs aux consommateurs par le biais d'une communication bidirectionnelle technologie pour contrôler les appareils au niveau des consommateurs et des ménages dans un effort pour économiser l'énergie, réduire les coûts et augmenter les niveaux de fiabilité et de transparence. De plus, ce type de tarification horaire de l'électricité en temps réel atténue également les pics de prix.
La technique réponse à la demande (DRT) fait référence aux changements dans la consommation d'électricité par les clients par rapport à leurs modèles de consommation normaux en réponse aux changements du prix de l'électricité en fonction du temps. DRT joue un rôle important dans la réduction de la charge de pointe et dans l'augmentation de l'utilisation efficace de l'énergie. De plus, les consommateurs peuvent obtenir des avantages en réduisant leurs coûts d'électricité. Cette stratégie réduit le coût de production de l'électricité et maintient l'équilibre entre l'offre et la demande lorsque des urgences du système sont prévues. Par conséquent, les industries manufacturières ont établi un nouveau ordonnancement de production pour économiser l'énergie après avoir tenu compte des coûts d'électricité en fonction du temps.
La principale contribution de cette étude de cas réside dans l'intégration de la stratégie de la réponse à la demande (DRT) dans un nouveau modèle MILP d'ordonnancement conjoint de la production et de la maintenance afin de minimiser les coûts de production, définis comme la somme pondérée des coûts de l'électricité en fonction du temps et les coûts de production liés au temps de réalisation de l'atelier de fabrication des coussins en mousse. La technique de la réponse à la demande (DRT) des entreprises manufacturières est donc importante, et elle deviendra encore plus dans un environnement de réseau intelligent.

Afin de décrire mathématiquement une problématique composée des machines en parallèle, dont les coûts dépendent de la machine et du temps, un nouveau modèle mathématique a été mis au point. Les paramètres, les variables de décision et le modèle proposé sont les suivants :

Tableau 4.7 : Notations utilisées pour formuler les problèmes

Indices :	
i	Indice des tâches.
j	Indice des machines.
t	Indices de temps.
Ensembles :	
J	Ensemble des tâches; $J = \{1, \dots, n\}$.
M	Ensemble des machines; $M = \{1, \dots, m\}$.

Paramètres :	
n	Nombre des tâches.
m	Nombre des machines.
st	Heure de début disponible.
dt	Délais prévus disponible.
$T_{i,j}$	Temps de traitement (en heures), $(1 \leq i \leq n),\ (1 \leq j \leq m)$.
$Elec_t$	Tarifs horaires de l'électricité (en DH).
$Cons_j$	Consommation d'énergie (en kilowattheures).
Penalty Cost	Coût de la pénalité (ou frais de main-d'œuvre pour chaque heure supplémentaire).
Variables de décision :	
$x_{i,j,t}$	$\begin{cases} 1 \text{ si la tâche i est traitée au temps t dans la machine j} \\ 0 \text{ Sinon} \end{cases}$
$y_{i,j}$	$\begin{cases} 1 \text{ si la tâche j est affectée à la machine i} \\ 0 \text{ Sinon} \end{cases}$
$z_{i,j}$	$\begin{cases} 1 \text{ si PM est effectuée immédiatement avant la ième tâche dans la machine j} \\ 0 \text{ sinon} \end{cases}$
Variables auxiliaires :	
$S_{i,j}$	L'heure de début de la tâche i.
$C_{i,j}$	L'heure de fin de de la tâche i.
$a_{i,j}$	L'âge de la machine après la tâche i dans la machine j.
$b_{i,j}$	L'âge de la machine avant la tâche i dans la machine j.

4.4.2. Fonction mono-objectif : Cas du modèle à machines parallèles

Notre nouvelle modèle d'ordonnancement de la production et de la maintenance permet aux entreprises de minimiser leurs coûts de production, définis comme la somme pondérée des coûts d'électricité dépendant du temps et des coûts de production relatifs à la durée de réalisation de toute les tâches (makespan C_{max}).

4.4.2.1. Coût d'électricité (Electricity Cost)

Le coût total de l'électricité est égal à la consommation d'énergie des machines de production $Cons_j$ multipliée par le tarif horaire de l'électricité (en DH) $Elec_t$, qui peut être calculée à l'aide de l'équation suivante (6.1),

$$\text{Electricity Cost} = \sum_{i=1}^{n} \sum_{j=1}^{m} \sum_{t=1}^{24} x_{i,j,t} \times Elec_t \times Cons_j \quad (4.2.1)$$

4.4.2.2. Coût maximal lié au temps d'achèvement

Le coût maximal lié au temps d'achèvement correspond au coût de production relatifs à la durée de réalisation de toute les tâches (makespan C_{max}).

$$C_{max} \times \text{Penalty Cost} \quad (4.2.2)$$

Par ailleurs, nous supposons que le coût des pénalités (ou les frais de main-d'œuvre pour chaque heure supplémentaire) était de 120 DH/h.

4.4.2.3. Coût total d'électricité (Total Cost)

L'objectif est de minimiser la somme du coût maximal lié au temps d'achèvement et du coût de l'électricité, définis comme la somme pondérée des coûts d'électricité dépendant du temps et des coûts

de production relatifs à la durée de réalisation de toute les tâches (makespan C_{max}), qui se calcule dans les conditions suivantes :

$$\text{Total Cost} = C_{max} \times \text{Penalty Cost} + \text{Electricity Cost} \quad (4.2.3)$$

4.4.3. Modélisation du problème $\mathbf{Rm|nr-CI-DRT|_{Total\ Cost}}$

Le modèle de programmation linéaire à nombres entiers mixtes MILP :

Minimiser $\text{Total Cost} = C_{max} \times \text{Penalty Cost} + \text{Electricity Cost}$

$$\sum_{t=1}^{24} x_{i,j,t} = T_{i,j} \cdot z_{i,j} \quad ; \forall i,j \quad (4.2.4)$$

$$C_{i,j} = S_{i,j} + T_{i,j} \quad ; \forall j,k \quad (4.2.5)$$

$$S_{i,j} \geq C_{i,j-1} \quad ; \forall j,k \quad (4.2.6)$$

$$S_{i,j} \geq C_{i-1,j} + PM_j \cdot y_{i,j} \quad ; \forall j,k \quad (4.2.7)$$

$$a_{i,j} = b_{i,j} + \sum_{t=1}^{24} x_{i,j,t} \quad ; \forall k \ , \ \forall j \quad (4.2.8)$$

$$b_{i+1,j} = a_{i,j}\,(1 - Y_{i+1,j}) \quad ; \forall j,k \leq n \quad (4.2.9)$$

$$\sum_{i=1}^{n} \sum_{t=1}^{24} x_{i,j,t} \leq C_{max} \quad ; \forall j \quad (4.2.10)$$

$$\sum_{i=1}^{n} \sum_{j=1}^{m} \sum_{t=1}^{24} x_{i,j,t} \times Elec_t \times Cons_j = \text{Electricity Cost} \quad (4.2.11)$$

$$\sum_{i=1}^{n} \sum_{t=1}^{st-1} x_{i,j,t} = 0 \quad ; \forall j \quad (4.2.12)$$

$$\sum_{i=1}^{n} \sum_{t=dt+1}^{24} x_{i,j,t} = 0 \quad ; \forall j \quad (4.2.13)$$

$$\sum_{j=1}^{m} z_{i,j} = 1 \quad ; \forall i \quad (4.2.14)$$

La fonction objectif est de minimiser la somme du coût total lié au temps de réalisation et du coût de l'électricité.
L'équation (4.2.4) montre les relations entre les variables de décision et le temps de traitement.
La contrainte (4.2.5) établit le lien entre l'heure de début et l'heure de fin de la tâche.
La contrainte (4.2.7) garantit que le job i ne doit pas commencer avant la somme de l'heure de fin du job précédent immédiat dans la machine j et du temps de maintenance possible.
Les contraintes (4.2.8) et (4.2.9) spécifient l'âge des machines avant et après chaque job, respectivement. L'inégalité (4.2.10) garantit que le temps d'achèvement de chaque machine est inférieur ou égal au makespan. L'équation (4.2.11) calcule le coût total de l'électricité.
Les équations (4.2.12) et (4.2.13) garantissent que toutes les tâches sont traitées pendant le temps disponible. L'équation (4.2.14) garantit que toutes les tâches sont affectées à une machine. Ces formulations peuvent être résolues dans un solveur de programmation linéaire à nombres entiers mixtes tel que CPLEX.

4.4.4. Résultats et analyses numériques des calculs

Notre problématique consistait en cinq tâches et deux machines, et de six tâches et trois machines pour deux scénarios. Dans chaque scénario, les tâches avaient des temps de traitement différents pour chaque machine avec différents niveaux de consommation d'énergie (Figure 4.17). Le prix horaire actuel de l'électricité pour la charge de pointe, la charge moyenne et la charge creuse a été utilisé comme données d'entrée. Les données de prix de l'électricité industrielle proviennent du site de la société Amendis en charge de la gestion déléguée des services d'assainissement liquide (eaux usées et eaux de pluie), de distribution d'eau potable et d'électricité dans les régions de Tanger et de Tétouan.

Toutes les formulations MILP sont modélisées en utilisant IBM ILOG CPLEX12.6 et le langage OPL. Les instances sont résolues sur un ordinateur portable HP 4300U doté d'un processeur Intel Core i5 Duo cadencé à 2,50 GHz et de 8 Go de mémoire RAM.

- Nous partons donc du principe que l'heure de début disponible est $st = 7h$ et l'heure d'échéance est $dt = 23h$.
- Nous supposons également que le coût de la pénalité (ou les frais de main-d'œuvre pour chaque heure supplémentaire) était de 120 DH/h.

Scénario n° 1 : Le tableau 4.10 présente la solution optimale du scénario n° 1 : Problème à 5 jobs et 2 machines.

- Le problème à résoudre est constitué de 5 tâches et de 2 machines (Tableau 4.8).
- Les consommations d'énergie pour chaque machine étaient respectivement de 100 et 250 kWh (Tableau 4.9).

Le tableau 4.8 montre une illustration du temps de traitement de chaque tâche et comme le montre le présent tableau, deux machines possèdent des temps de traitement différents pour une même tâche, ce qui signifie qu'elles ont des capacités ou des niveaux de performance différents pour traiter la même tâche.

Tableau 4.8 : Temps de traitement des tâches (heures) pour le scénario n° 1

	Job 1	Job 2	Job 3	Job 4	Job 5
Machine 1	3	5	8	7	9
Machine 2	2	2	1	4	5

Tableau 4.9 : Données de consommation électrique pour le scénario n° 1

	Machine 1	Machine 2
Consommation électrique (kWh)	100	250

Tableau 4.10 : Résultats du scénario n° 1

	Electricity Cost	Total Cost	Cmax
scénario n° 1	2365,1	3445,1235	9

Résultat du scénario n° 1 : Le tableau 4.10 illustre le résultat de la saisie des données de configuration obtenus pour le scénario n° 1(voir Annexe, **Figure A1.1)**.

- Notre méthode de résolution a réduit le coût total du scénario n° 1.

Scénario n° 2 : Le tableau 4.13 présente la solution optimale du scénario n° 2 : (6 tâches et de 3 machines).

- Le problème à résoudre est constitué de 6 tâches et de 3 machines (Tableau 4.11).
- Les consommations d'énergie pour chaque machine étaient respectivement de 100, 250 et 200 kWh, respectivement (Tableau 4.12).

Tableau 4.11 : Temps de traitement des tâches (heures) pour le scénario n° 2

	Job 1	Job 2	Job 3	Job 4	Job 5	Job6
Machine 1	3	5	8	7	9	5
Machine 2	2	2	1	4	5	2
Machine 3	6	5	6	3	7	5

Tableau 4.12 : Données de consommation électrique pour le scénario n° 2

	Machine 1	Machine 2	Machine 3
Consommation électrique (kWh)	100	250	200

Tableau 4.13 : Résultats du scénario n° 2

	Electricity Cost	Total Cost	Cmax
scénario n° 2	2379,8	3459,7655	9

Résultat du scénario n° 2 : Le tableau 4.13 illustre le résultat de la saisie des données de configuration obtenu pour le scénario n° 2 (voir Annexe, **Figure A1.2)**.

- Notre méthode de résolution a réduit le coût total du scénario n° 2.

4.5. Conclusion

Ce chapitre vise à faire progresser le concept d'industrialisation en adoptant une approche plus intelligente et plus ciblée des questions écologiques et environnementales. Notre présence au sein de l'entreprise Martur Fompak INTERNATIONAL répondait au besoin exprimé en vue de résoudre deux problématiques majeures dans l'entreprise ; à savoir une grande consommation d'énergie au niveau de l'atelier de production des sièges et un coût élevé en vigueur dans l'atelier de fabrication des coussins en mousse.

Le présent chapitre présente une résolution de ces problématiques comme suit :

- En intégrant trois aspects, à savoir la production, la maintenance préventive et la prise en compte de l'énergie pour l'atelier flow shop, avec la contrainte de maintenance préventive et la contrainte de demande maximale. pour les ateliers de flux, avec la contrainte PM et la contrainte de demande de pointe. Un modèle mathématique Un modèle mathématique est établi, et une méta-heuristique basée sur NSGA-II et une méthode de décodage est conçue pour résoudre le modèle de manière efficace. pour résoudre le modèle de manière efficace. En utilisant cette approche, la frontière de Pareto peut être obtenue pour équilibrer le compromis entre l'objectif économique et l'objectif environnemental. Les résultats numériques montrent que les impacts de la contrainte PM et de la contrainte de demande de pointe doivent être analysés au cas par cas. Cette recherche est étroitement liée à l'application pratique dans les installations industrielles. Les principales implications pratiques peuvent être formulées à partir de quatre points : Premièrement, le problème de la gestion des opérations d'une usine de fabrication est un sujet compliqué qui comporte différents aspects. L'efficacité de la recherche sera réduite si les chercheurs ne se concentrent que sur l'étude théorique d'un seul aspect. La seule façon de combler l'écart entre la théorie et la réalité est d'étudier le problème de l'intégration. Deuxièmement, le directeur de l'usine peut réduire le makepan si une plus grande consommation d'énergie peut être acceptée par le directeur. d'énergie. Cependant, le makepan ne peut pas être constamment réduit en raison de la contrainte de la demande de pointe. Troisièmement, la durée de la maintenance a un effet important sur le délai d'exécution et n'a pas d'effet sur la consommation totale d'énergie. Les positions des MP doivent être déterminées en tenant compte de la décision de mise en marche et d'arrêt des machines. Quatrièmement, bien que la consommation totale d'énergie soit causée par trois parties, les tâches de traitement occupent la plus grande partie de la consommation d'énergie. occupent la plus grande partie de la

consommation d'énergie. Le directeur de l'usine doit donc prêter attention aux tâches de traitement plutôt qu'au temps d'inactivité et à la configuration.

- En intégrant la stratégie de la réponse à la demande (DRT) dans un nouveau modèle MILP d'ordonnancement de la production et de la maintenance afin de minimiser les coûts de production, définis comme la somme pondérée des coûts de l'électricité en fonction du temps et les coûts de production liés au temps de réalisation de l'atelier de fabrication des coussins en mousse. Les industries manufacturières, notamment au Maroc, doivent envisager leur ordonnancement en tenant compte des coûts d'électricité dépendant du temps et des machines. En résolvant le problème de l'ordonnancement, on peut réduire les coûts, économiser de l'énergie et réduire les émissions de gaz à effet de serre. Dans cette partie, nous avons intégré la stratégie de la réponse à la demande (DRT) dans un nouveau modèle MILP d'ordonnancement conjoint de la production et de la maintenance afin de minimiser les coûts de production, définis comme la somme pondérée des coûts de l'électricité en fonction du temps et les coûts de production liés au temps de réalisation de l'atelier de fabrication des coussins en mousse. La technique de la réponse à la demande (DRT) des entreprises manufacturières est donc importante, et elle deviendra encore plus dans un environnement de réseau intelligent. Le modèle est proposé afin de résoudre le problème des machines parallèles non liées avec la même date d'échéance et des temps d'inactivité insérés. Deux instances de problèmes d'ordonnancement de machines parallèles non liées ont été testées. La méthode de résolution exacte a permis de réduire 20% du coût total de l'électricité pour l'atelier de fabrication des coussins en mousse.

En outre, les méthodes présentent d'excellentes performances en termes de faisabilité et d'exhaustivité. À l'avenir, il sera également très intéressant d'étudier la manière de répondre à la demande d'énergie d'une usine en utilisant le système de micro-réseau.

Chapitre 5

Optimisation de l'énergie dans un scénario des smart grids : Étude de cas au Canada

Chapitre 5
Optimisation de l'énergie dans un scénario des smart grids : Étude de cas au Canada

5.1. Introduction

Les Québécois sont les plus grands consommateurs d'énergie au monde ainsi que les récentes publications d'Hydro-Québec démontrent un réel besoin de stratégies pour réduire la capacité de pointe. De 2009 à 2019, la demande de pointe au Québec a augmenté de 5,6 %, alors que la consommation n'a cru que de 4,4 %. Cela signifie qu'au fil des années, il faut qu'Hydro-Québec Distribution s'assure d'avoir une plus grande puissance pour pouvoir fournir l'électricité lors des épisodes annuels de grande demande, alors que les ventes totales n'augmentent pas dans une même proportion. D'environ 34 000 MW en 2009, la pointe dépasse maintenant les 36 000 MW. D'un point de vue économique, cela induit une pression à la hausse sur le prix du kilowattheure, car les frais supplémentaires pour répondre à la demande de pointe croissante ne sont pas récupérés sur un volume de ventes assez grand. Cette demande nécessite aussi des importations ponctuelles qui peuvent coûter très cher.

Les observations qui suivent aideront à comprendre les tendances actuelles et éventuelles de la consommation d'énergie dans l'industrie Canadienne :

- Le secteur industriel représente la plus grande part de la consommation d'énergie au Canada. La consommation d'énergie du secteur industriel est dominée par une forte concentration d'industries énergivores. En conséquence, l'assise industrielle contribue pour beaucoup à la forte intensité énergétique du pays.
- En termes de production économique, le secteur des services au Canada est sensiblement plus important que le secteur des biens et il croît plus rapidement. Le secteur des services consomme sensiblement moins d'énergie par unité ($) de production économique. Comme la part du secteur des services augmente par rapport au secteur des biens, le bilan de l'intensité énergétique de l'économie canadienne continuera de s'améliorer.
- La dynamique des marchés internationaux, y compris la montée des économies en développement, a fait gonfler la demande de nombreux biens canadiens. L'augmentation du commerce des marchandises qui sont associées aux industries énergivores influence les tendances globales de la demande d'énergie au Canada.
- Les nouvelles technologies continuent d'améliorer le bilan de l'intensité énergétique de l'industrie canadienne. Si l'on se tournait vers des technologies plus transformatrices et innovatrices, cette tendance irait même en s'amplifiant. Cela pourrait comprendre le remplacement de combustibles par des combustibles renouvelables, la cogénération, la récupération de la chaleur et d'autres technologies propres. Le rythme d'adoption des nouvelles technologies dépend souvent de décisions fondées sur le risque, des investissements en capital nécessaires, des prix de l'énergie escomptés en termes absolus et en termes relatifs, de la stabilité du marché des biens sous-jacent et de la capacité de l'entreprise de pouvoir tabler sur une nouvelle technologie.

On s'attend à ce que le secteur industriel demeure le premier consommateur d'énergie au Canada dans les années à venir. Ainsi, l'objectif d'une gestion globale et automatisée de l'énergie est de réaliser des gains (directs ou indirects) en introduisant une gestion analytique des consommations. Les économies d'énergie que l'on peut espérer sont de différents types :

1. Réduction de la facture énergétique,
2. Maîtrise des coûts de non qualité,
3. Maintenance préventive,
4. Sensibilisation aux dépenses énergétiques.

Parmi toutes les formes d'énergie, l'énergie électrique est le vecteur qui est le plus noble et le plus facile à mettre en œuvre. C'est pourquoi la proportion d'énergie électrique dans l'énergie totale consommée, ne cesse de croître. La gestion de l'énergie électrique, dont il est impératif de se préoccuper est l'une des composantes d'une maîtrise totale de l'énergie. Le développement récent des moyens informatiques et des automatismes programmables apporte des solutions très performantes qui permettent d'appréhender la maîtrise de cette énergie.

Dans ce contexte, une deuxième étude de cas a été identifiée dans la société Gaspésie Diesel Inc., qui est devenue une référence en matière de réparation et d'entretien de véhicules de toutes marques située à New Richmond du Québec (cette entreprise est équipée d'une ligne de fabrication dans le département des pièces). Le présent chapitre présente une résolution des enjeux liés à cette entreprise canadienne, comme suit :

- En intégrant la technique Dynamic Speed Scaling (DSST) au système étudié où les machines sont échelonnées en fonction de la vitesse. Un modèle MILP est formulé afin d'intégrer cette gestion intelligente dans l'ordonnancement conjoint de la production et de la maintenance en vue d'optimiser la consommation totale d'énergie.
- La mise en œuvre d'un programme de gestion de la demande, utilisant le prix comme une mesure d'incitation avec un prix variable par bloc ("taux d'utilisation" ou TOU). Un nouveau modèle d'optimisation des coûts de l'électricité est proposé pour l'ordonnancement intégré des tâches de la production et de la maintenance dans le cadre du système de tarification de l'électricité en fonction de l'heure de consommation (TOU) dans des machines parallèles non liées, dans lesquelles le prix de l'électricité varie tout au long de la journée.
- La mise en place d'une gestion des usages énergétiques dans l'atelier afin d'optimiser la demande de pointe. La recherche vise à minimiser la pointe de puissance soutirée (la pointe de consommation énergétique) par un atelier de production en contrôlant de façon coordonnée les appareils auxiliaires et le chauffage. Un algorithme de contrôle est proposé pour évaluer les résultats atteignables et différents formats de prix pouvant inciter les comportements désirés des consommateurs sont présentés. Les résultats atteignables et la pertinence des formats de prix sont testés sur des données simulées de besoins en appareils auxiliaires et pour les températures de 2020 au Canada. L'évaluation des résultats atteignables montre une baisse du pic de puissance soutirée. L'étude des formats de prix montre qu'un format de prix dual facturant consommation et puissance maximale soutirée est approprié pour inciter le comportement souhaité.

En dernier lieu, une synthèse de cette contribution expérimentale est présentée.

5.2. Problématique industrielle soulevée

La société Gaspésie Diesel possède une ligne de fabrication de pièces constituée de sept machines parallèles. Dans ce contexte, notre étude de cas est effectuée dans l'atelier "Unerellated Parallel Machine" situé au Québec, il s'agit d'un atelier d'usinage comprenant six appareils auxiliaires avec sept machines de production. Les problématiques soulevées par l'industriel sont décrites par l'industriel dans le tableau 5.1.

Tableau 5.1 : Problématiques et pistes de réflexion au sein de l'entreprise Gaspésie Diesel

Problématiques		**Questions de recherche ?**	**Modèles et solutions proposées dans un scénario des « Smart Grids»**
1ère problématique	Performances énergétiques intensives en termes de consommation	Comment intégrer les PM dans l'ordonnancement afin de minimiser simultanément le temps Cmax, l'énergie et les pannes imprévues?	Intégration de la technique (« Dynamic Speed Scaling », DSST) $\mathbf{Rm\|nr-CI-DSS\|_{T.\ Energy}}$
		Comment minimiser l'évolution de la consommation énergétique dans l'atelier de production?	
2éme problématique	Gestion énergétique inefficace et couteuse en termes de coûts énergétiques	Comment minimiser les coûts d'électricité?	Mise en œuvre d'un programme de gestion de la demande (« Time-of-Use», TOU) $\mathbf{Rm\|nr-CI-TOU\|_{T.Electricity.Cost}}$
3éme problématique	Forte pic de consommation du aux usages énergétiques (les appareils auxiliaires et le chauffage)	Comment minimiser le pic de consommation électrique dans l'atelier de production et quels résultats sont atteignables ?	Mise en place d'une gestion des usages énergétiques dans l'atelier afin d'optimiser la demande de pointe en contrôlant de façon coordonnée les appareils auxiliaires et le chauffage $\mathbf{Rm\|\|_{T.Cost,\ Pic}}$

5.3. Formulation mathématique de la 1ère problématique : Performances énergétiques intensives en termes de consommation

L'atelier étudié possède une forte consommation énergétique qui nécessite de mettre en place une gestion intelligente afin d'optimiser la performance énergétique en termes de consommation. Cette étude examine un problème d'ordonnancement conjoint des jobs et des PM dans l'atelier étudié **« Unerellated Parallel Machine»,** afin de minimiser la consommation totale d'énergie dans cet atelier de fabrication des pièces.

Dans ce contexte, un modèle MILP est basée sur l'intégration de la technique (« Dynamic Speed Scaling », DSS) au système étudié où les machines sont échelonnées en fonction de la vitesse. Le modèle est formulé afin d'intégrer cette gestion intelligente dans l'ordonnancement conjoint de la production et de la maintenance en vue d'optimiser la consommation totale d'énergie. Dans la mesure où le problème consiste à affecter des tâches aux machines et à sélectionner un niveau de vitesse de traitement approprié pour chaque tâche. La mise en œuvre d'une gestion intelligente de la charge en tant que solution pour le contrôle de la consommation (systèmes de contrôle, gestion optimale, variateurs de vitesse au sein de toutes les machines, etc.).

Ce pilotage intelligent proposé est basé sur l'intégration de la technique ("Dynamic Speed Scaling", DSS) au sein du système étudié où les machines sont mises à l'échelle en fonction de la vitesse. Les indices, paramètres et variables utilisés dans cette formulation sont indiqués dans le tableau 5.2.

Tableau 5.2 : Notations utilisées pour formuler la 1ère problématique étudiée

Indices :	
i	Indice des tâches.
j	Indice des machines.
s	Indice du niveau de vitesse.
Paramètres :	
n	Nombre des tâches.
m	Nombre des machines.
S	Nombre des niveaux de vitesse.
$w_{i,j}$	Charge de travail requise de la tâche $i(1 \leq i \leq n)$ sur la machine j $(1 \leq j \leq m)$.
V_s	Vitesse de traitement d'une machine fonctionnant au niveau de vitesse s.
P_0	Puissance de fonctionnement des équipements et installations auxiliaires.
PM_j	Temps nécessaire pour effectuer la maintenance préventive (PM) de la machine.
Variables de décision :	
$x_{i,j,s}$	$\begin{cases} 1 & \text{Si la tâche i est assignée à la machine j au niveau de la vitesse } s \\ 0 & \text{Sinon} \end{cases}$
$y_{i,j}$	$\begin{cases} 1 & \text{Si PM est effectué avant la ième tâche à la machine j} \\ 0 & \text{Sinon} \end{cases}$
$C_{i,j}$	Temps de traitement de la ième tâche sur la machine j au niveau de vitesse s.
$p_{i,j,s}$	Temps de traitement réel de la tâche i sur la machine j au niveau de vitesse s.
$P_{i,j,s}$	Taux de consommation d'énergie pour le traitement du travail i sur la machine j au niveau de vitesse s.
C_{max}	Le makespan, qui correspond à la durée maximale d'exécution de toutes les tâches.
$a_{i,j}$	L'âge de la machine après la tâche i sur la machine j.
$b_{i,j}$	L'âge de la machine avant la tâche i sur la machine j.

Hypothèses :

- Un ensemble de n jobs indépendants doit être traité sur un ensemble de sept machines parallèles non liées entre elles.
- Chaque machine ne peut traiter qu'un seul job à la fois et chaque job ne peut être traité que sur une seule machine.
- Aucune préemption n'est autorisée.
- Les machines peuvent traiter des jobs à différents niveaux de vitesse, qui sont sélectionnés parmi un ensemble de niveaux S.

Soit V_S $(1 \leq s \leq S)$ représente la vitesse de traitement d'une machine fonctionnant au niveau de vitesse s.

Dans notre cas d'étude, toutes les machines parallèles non liées partagent la même vitesse de traitement au niveau s. Sans perdre de vue la généralité, supposons que $v_1 < v_2 < \ldots < v_S$. La charge de travail requise pour la tâche i $(1 \leq i \leq n)$ sur la machine$(1 \leq j \leq m)$, désignée par $w_{i,j}$, dépend à la fois de la tâche elle-même et de la machine sur laquelle elle est traitée. Le temps de traitement réel de la tâche i sur la machine j au niveau de vitesse s, désigné par $T_{i,j,s}$, peut être calculé par $T_{i,j,s} = \frac{w_{i,j}}{V_s}$. Soit

$P_{i,j,s}$ le taux de consommation d'énergie pour le traitement de la tâche i sur la machine j au niveau de vitesse s. On obtient alors la consommation d'énergie réelle nécessaire pour le traitement de la tâche i sur la machine j au niveau de vitesse de traitement s, désignée par $Q_{i,j,s}$, en multipliant le temps de traitement réel et son taux de consommation d'énergie correspondant. Autrement dit, $Q_{i,j,s} = P_{i,j,s} \times \frac{w_{i,j}}{V_s}$. Nous supposons que si $V_x > V_y$ (x, y $\in \{1, \dots, S\}$) , alors $Q_{i,j,x} > Q_{i,j,y}$ vaut pour toute paire de i $\in \{1, \dots, N\}$ et j $\in \{1, \dots, M\}$. Cela suggère qu'une vitesse de traitement plus élevée entraînera une réduction du temps de traitement mais une augmentation de la consommation d'énergie.

Le problème consiste à attribuer les tâches à traiter aux machines et à choisir une vitesse de traitement appropriée pour chaque tâche de manière à minimiser la consommation totale d'énergie.

5.3.1. Fonction objectif : T. Energy

Notre nouvelle modèle d'ordonnancement de la production et de la maintenance permet aux entreprises de minimiser la consommation totale d'énergie (**T. Energy**) qui inclut principalement la consommation d'énergie des machines-outils et la consommation d'énergie des équipements communs. La consommation totale d'énergie (**T. Energy**) de l'atelier étudié, qui englobe principalement la consommation d'énergie de traitement des tâches dans les machines-outils et la consommation d'énergie commune. Cette dernière étant calculée comme suit:

$$\mathbf{T.\,Energy} = P\,E\,C + C\,E\,C \tag{5.1.1}$$

5.3.1.1. Consommation d'énergie de traitement des tâches (PEC)

La consommation d'énergie de traitement des tâches peut être calculée à l'aide de l'équation (5.1.2),

$$P\,E\,C = \sum_{i=1}^{n}\sum_{j=1}^{m}\sum_{s=1}^{S} w_{i,j} \cdot \frac{P_{i,j,s}}{V_s} \cdot x_{i,j,s} \tag{5.1.2}$$

5.3.1.2. Consommation énergétique des appareils communs (CEC)

La consommation d'énergie commune peut être calculée par l'équation suivante (5.1.3),

$$C\,E\,C = P_0 \cdot C_{max} \tag{5.1.3}$$

5.3.1.3. Consommation totale d'énergie (T. Energy)

Notre fonction objective est la minimise de la consommation totale d'énergie (TEC), qui se calcule dans les conditions suivantes :

$$\text{Fct Obj} = \mathbf{T.\,Energy} \tag{5.1.4}$$

$$\text{Fct Obj} = P\,E\,C + C\,E\,C \tag{5.1.5}$$

$$\text{Fct Obj} = \sum_{i=1}^{n}\sum_{j=1}^{m}\sum_{s=1}^{S} \frac{w_{i,j} \cdot P_{i,j,s}}{V_s} \cdot x_{i,j,s} + P_0 \cdot C_{max} \tag{5.1.6}$$

5.3.2. Modélisation du problème : $\mathbf{Rm|nr-CI-DSS|_{T.\ Energy}}$

Minimiser **T. Energy**
Sous les contraintes suivantes :

$$\sum_{j=1}^{m}\sum_{s=1}^{S} x_{i,j,s} = 1 \qquad ; i = 1, 2, \dots, n \tag{5.1.7}$$

$$C_{i,j} \geq C_{i-1,j} + PM_j \cdot y_{i,j} + \sum_{s=1}^{S} \frac{w_{i,j}}{V_s} \cdot x_{i,j,s} \quad ; i = 2,3,\dots,n\ , j = 1,2,\dots,m \tag{5.1.8}$$

$$b_{1,j} = 0\ ,\ y_{1,j} = 0 \quad ;\ j = 1,2,\dots,m \tag{5.1.9}$$

$$a_{i,j} = b_{i,j} + \sum_{i=1}^{n}\sum_{s=1}^{S} \frac{w_{i,j}}{V_s} \cdot x_{i,j,s} \quad ; i = 1,2,\dots,n\ , j = 1,2,\dots,m \tag{5.1.10}$$

$$b_{i+1,j} = a_{i,j}\ (1 - Y_{i+1,j}) \quad ; i = 2,3,\dots,n\ , j = 1,2,\dots,m \tag{5.1.11}$$

$$C_{max} == C_{n,m} \quad ; i = 1,2,\dots,n\ , j = 1,2,\dots,m \tag{5.1.12}$$

$$TEC \geq \sum_{i=1}^{n}\sum_{j=1}^{m}\sum_{s=1}^{\delta} \frac{w_{i,j} \cdot P_{i,j,s}}{V_s} \cdot x_{i,j,s} + P_0 \cdot C_{max} \tag{5.1.13}$$

$$C_{i,j}\ ,\ C_{max},\ P_{i,j,s}, TEC \geq 0 \quad ; i = 2,3,\dots,n, j = 1,2,\dots,m, s = 1,\dots,S \tag{5.1.14}$$

$$x_{i,j,s} \in \{0,1\}\ ,\ y_{i,j} \in \{0,1\} \quad ;\ i = 2,3,\dots,n\ , j = 1,2,\dots,m\ \ , s = 1,\dots,S \tag{5.1.15}$$

Les contraintes (5.1.7) indiquent que chaque tâche i ne peut être traitée que sur une seule machine à un seul niveau de vitesse. Les contraintes (5.1.8) établissent le lien entre la $(i-1)$ème tâche et la $i-$ème tâche et garantissent que le temps d'achèvement de la $i-$ème tâche dans la machine j n'est pas antérieur à son temps d'achèvement de la $(i-1)$ ème tâche vers la machine j plus la somme du temps de traitement de la tâche i et de la maintenance préventive quand elle existe de la $i-$ème tâche (la période de la maintenance PM possible). Les contraintes (5.1.9) spécifient la condition initiale du système. Les ensembles de contraintes (5.1.10) et (5.1.11) spécifient l'âge des machines avant et après chaque tâche i, respectivement. La contrainte (5.1.12) représente le temps d'achèvement maximum de tous les tâches traitées sur la machine j. Cette contrainte restreint que le makespan ne soit pas inférieur aux temps d'achèvement maximum sur toutes les machines. La contrainte (5.1.13) spécifie que la consommation totale d'énergie est la somme de la quantité d'énergie consommée pour le traitement de toutes les tâches. L'ensemble de contraintes (5.1.14) est constitué des contraintes de non-négativité. Les contraintes (5.1.15) mettent en place les restrictions binaires pour $x_{i,j,s}$ et $y_{i,j}$, respectivement.

5.3.3. Résolutions et évaluation de la performance du modèle: $Rm|nr-CIV|_{T.Energy}$

Cette section est consacrée à l'analyse exacte des performances du modèle linéaire correspondant au système étudié. Cependant, avec une méthode exacte telle que Branch and bound intégrée dans le solveur de programmation linéaire commercial CPLEX est proposée. Il est nécessaire de qualifier l'état de complexité et d'optimalité du problème considéré. Afin d'évaluer la puissance de calcul du modèle proposé, le problème doit être examiné dans ses cas les plus difficiles. En outre, les hypothèses adoptées pour le problème étudié :

- la charge de travail requise pour le traitement des emplois $w_{i,j}$ sont des entiers générés uniformément à partir d'un intervalle $[5, 50]$.
- Le taux de consommation d'énergie $P_{i,j,s}$ pour la tache i sur la machine j avec la vitesse V_s , qui est uniformément choisi parmi $[2, 8]$.
- Le temps de maintenance préventive de la machine PM est généré aléatoirement à partir de l'ensemble $\{9, 12, 15\}$.
- Nous supposons que la puissance des installations auxiliaires est égale à $P_0 = 4$;

- De ce fait, la consommation d'énergie correspondante du travail i sur la machine j avec la vitesse Vs est $Q_{i,j,s} = \frac{\delta w_{i,j} \cdot \delta P_{i,j,s}}{\delta V_s}$.
- Pour les niveaux de vitesse de traitement, nous ajustons S = 3 et $V_s = \{0,75, 1, 1,25\}$.

Le tableau 5.3 indique les temps de calcul moyens obtenus de l'unité centrale en secondes à l'aide du logiciel CPLEX 12.6 pour trouver la consommation d'énergie totale optimale pour résoudre les problèmes d'ordonnancement intégré dans les tâches de production et de maintenance préventive.

Tableau 5.3 : Analyse comparative des résultats obtenus par les différentes instances

Machine × Jobs		PM	W	P	P_0	C_{max}	TEC
7 × 5	Inst. 1	9	[5,20[	[2,4[	4	48	312
	Inst. 2	12	[20,35[	[4,6[	4	96	984
	Inst. 3	15	[35,50]	[6,8]	4	144	1656
7 × 7	Inst. 1	9	[5,20[	[2,4[	4	72	456
	Inst. 2	12	[20,35[	[4,6[	4	144	1416
	Inst. 3	15	[35,50]	[6,8]	4	216	2376
7 × 12	Inst. 1	9	[5,20[	[2,4[	4	264	1344
	Inst. 2	12	[20,35[	[4,6[	4	528	3552
	Inst. 3	15	[35,50]	[6,8]	4	792	6192

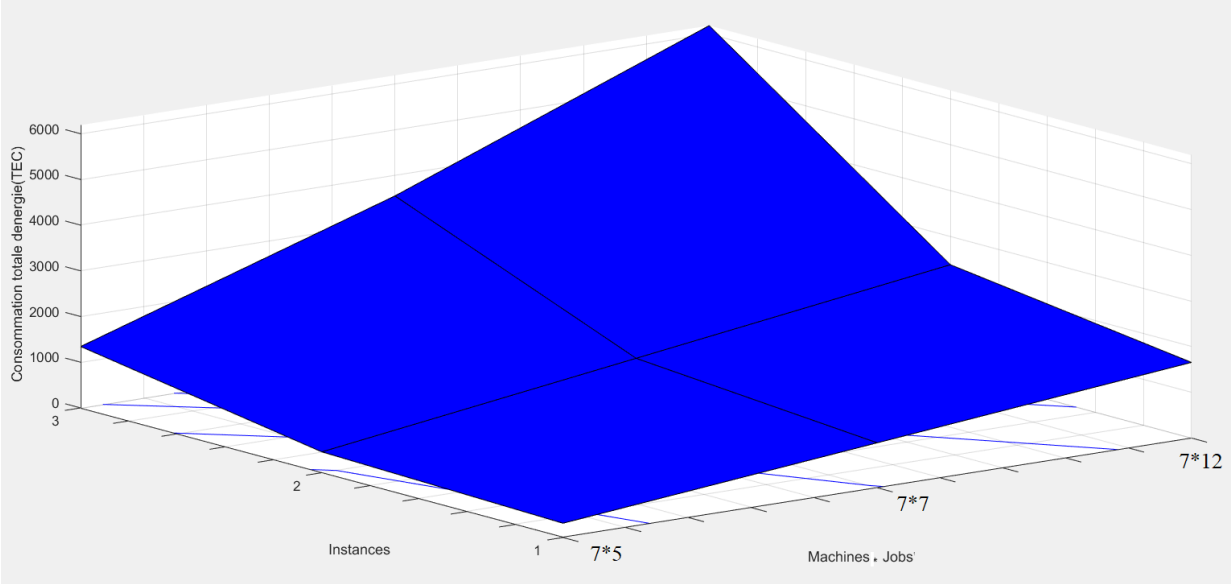

Figure 5.1 : Profils de consommation d'énergie pour les instances étudiées

5.4. Formulation mathématique de la 2ème problématique : Gestion énergétique inefficace et coûteuse en termes de coûts énergétiques

L'atelier de fabrication étudié possède une gestion énergétique déficiente permettant d'introduire des dépenses trop élevées, ce qui exige de mettre en place une gestion intelligente afin d'optimiser la performance énergétique en termes de coût. Sous cette rubrique, un modèle de MILP qui repose sur la mise en œuvre d'un programme de gestion de la demande, utilisant le prix comme une mesure d'incitation avec un prix variable par bloc ("taux d'utilisation" ou TOU) est proposé afin de minimiser les coûts d'électricité lors de l'ordonnancement intégré des tâches de la production et de la maintenance dans l'atelier de fabrication des pièces « Unerellated Parallel Machine».

Les indices, paramètres et variables utilisés dans cette formulation sont indiqués dans le tableau 5.4 :

Tableau 5.4 : Notations utilisées pour formuler la 2ème problématique étudiée

Indices :	
i	Indice des tâches.
j	Indice des machines.
k	Indice des intervalles dans la machine j.
Ensembles :	
J	Ensembles des tâches ; $J = \{1, 2, \dots, n\}$.
M	Ensemble des machines ; $M = \{1, 2, \dots, m\}$.
K	Ensemble des intervalles de temps ; $K = \{1, 2, \dots, K\}$.
Paramètres :	
N	Nombre des tâches.
M	Nombre des machines.
K	Nombre des intervalles.
S_k	Temps de départ des intervalles de temps k.
t_k	Durée de l'intervalle k est indiquée par $t_k = S_{k+1} - S_k$.
C_k	Prix de l'électricité durant la période k.
$T_{i,j}$	Temps de traitement de la tâche i dans la machine j.
PM_j	Durée de maintenance préventive sur la machine j.
$P_{i,j}$	Consommation d'énergie par unité de temps, appelée taux de consommation d'électricité, sur la machine j.
Décision variables :	
$x_{i,j,k}$	$\begin{cases} 1 & \text{si la tâche i est traitée à la période k sur la machine j} \\ 0 & \text{Sinon} \end{cases}$
$Y_{i,j,k}$	$\begin{cases} 1 & \text{si les MP sont traitées avant la période k sur la machine j} \\ 0 & \text{Sinon} \end{cases}$
$T'_{i,j,k}$	Temps de traitement réel de la tâche i dans l'intervalle k de la machine j, pour, $i \in J = \{1, 2, \dots, N\}$, $j \in M = \{1, 2, \dots, M\}$, $k \in K = \{1, 2, \dots, K\}$.
$u_{i,j,k}$	$\begin{cases} 1 & \text{Si la tâche i est traitée durant la période k et } k+1 \text{ sur la machine j} \\ 0 & \text{Sinon} \end{cases}$
$v_{i,j}$	$\begin{cases} 1 & \text{Si la tâche } i \text{ est traitée sur la machine j} \\ 0 & \text{Sinon} \end{cases}$
$a_{i,j,k}$	L'âge de la machine après la tâche i à la période k sur la machine j.
$b_{i,j,k}$	L'âge de la machine avant la tâche i à la période k sur la machine j.

Dans de nombreux pays du monde, la tarification de l'électricité en fonction de l'heure de consommation (TOU) a été appliquée pour encourager les fabricants à réduire leur consommation d'électricité des périodes de pointe aux périodes creuses. Le présent travail examine un nouveau modèle d'optimisation des coûts de l'électricité lors de l'ordonnancement intégré des tâches de la production et de la maintenance dans le cadre du système de tarification de l'électricité en fonction de l'heure de consommation (TOU) dans des machines parallèles non liées, dans lesquelles le prix de l'électricité varie tout au long de la journée. Le problème réside dans l'affectation d'un groupe de tâches, des intervalles flexibles de maintenance préventive à un ensemble de machines parallèles non liées, puis dans l'ordonnancement des tâches et de la maintenance préventive flexible sur chaque machine séparée, de manière à minimiser le coût total de l'électricité. Nous construisons un modèle amélioré de programmation linéaire mixte en temps continu (MILP) pour ce problème. Aucun document dans la littérature ne prend en compte à la fois l'ordonnancement de la production et la maintenance préventive stochastique dans le cadre d'un système de tarification de l'électricité en fonction du temps d'utilisation

(TOU) avec une minimisation des coûts totaux de l'électricité sur des machines parallèles non reliées. Dans cette problématique, il y a n jobs à traiter sur m machines parallèles. Toutes les commandes, disons celles de la tâche i, sont caractérisées par leur temps de traitement $T_{i,j}$ sur la machine j et leur consommation d'énergie par unité de temps, appelée taux de consommation d'électricité, sur la machine j, $P_{i,j}$, $i \in J = \{1, 2, \dots, N\}$, $j \in M = \{1, 2, \dots, M\}$. Notez que le temps de traitement et le taux de consommation électrique d'une tâche dépendent à la fois de la machine et de la tâche elle-même. Ainsi, le problème à l'étude est un problème d'ordonnancement des machines parallèles qui est indépendant. Chaque machine ne peut traiter qu'une seule tâche à la fois et chaque tâche ne peut être traitée sur plus d'une machine à la fois. Aucune préemption n'est autorisée. Toutes les tâches et les machines sont disponibles au début de l'horizon de production. La panne des machines et la maintenance préventive (PM) sont traitées simultanément pour ordonnancer les tâches.

Comme mentionné ci-dessus, les prix de l'électricité suivent un système de tarification des TOU. Autrement dit, les prix de l'électricité peuvent varier tout au long de la journée en fonction de la demande. Dans un système de tarification des TOU, l'horizon temporel est divisé en un ensemble de K périodes. La période k, $k \in K = \{1, 2, \dots, K\}$, est caractérisée par son heure de début S_k et le prix de l'électricité C_k, $k \in K = \{1, 2, \dots, K\}$.

- Dans le cadre général, Nous établissons $S_1 = 0$.
- La période k peut être représentée par l'intervalle $[S_k, S_{k+1}]$, $k \in K = \{1, 2, \dots, K\}$.
- La durée de la période k est désignée par $t_k = S_{k+1} - S_k$, $k \in K = \{1, 2, \dots, K\}$.
- Soit S_{k+1}, le makepan (le temps maximum d'achèvement) donné pour le traitement de tous les jobs.

Le problème examiné dans le présent travail consiste à attribuer les N tâches aux M machines parallèles indépendantes, puis à attribuer les périodes disponibles sur chaque machine correspondant à des tâches qui lui ont été affectées, de manière à minimiser le coût total de l'électricité. On note qu'une tâche peut être traitée sur deux ou plusieurs périodes adjacentes sur une machine.

5.4.1. Fonction Objectif : T. Electricity. Cost

Notre nouveau modèle proposé d'ordonnancement de la production et de la maintenance préventive stochastique dans le cadre d'un système de tarification de l'électricité en fonction du temps d'utilisation (TOU) permet de minimiser des coûts totaux de l'électricité sur des machines parallèles non reliées.

5.4.1.1. Coût total de l'électricité

L'objectif de ce modèle $\mathbf{Rm|nr-CI-TOU|_{T.Electricity.Cost}}$ est de minimiser le coût total de l'électricité ($\mathbf{T.Electricity.Cost}$) indispensable au traitement de tous les jobs, qui se calcule dans la fonction suivante :

$$\mathbf{T.Electricity.Cost} = \sum_{i=1}^{N}\sum_{j=1}^{M}\sum_{k=1}^{K} \mathbf{P_{i,j}.C_k}\,.\,\mathbf{T'_{i,j,k}} \quad (5.2.1)$$

5.4.2. Modélisation du problème : $\mathbf{Rm|nr-CI-TOU|_{T.Electricity.Cost}}$

Minimiser $\quad \mathbf{T.Electricity.Cost} = \sum_{i=1}^{N}\sum_{j=1}^{M}\sum_{k=1}^{K} P_{i,j}.C_k\,.\,T'_{i,j,k} \quad (5.2.1)$

Sous les contraintes suivantes :

$$\sum_{k=1}^{K}\sum_{j=1}^{M}(T'_{i,j,k}/T_{i,j}) = 1 \quad ;\forall i = 1..N \quad (5.2.2)$$

$$T'_{i,j,k} \le T_{i,j}\,X_{i,j,k} \quad ;\forall i = 1..N,\ k = 1..K, j = 1..M \quad (5.2.3)$$

$$\sum_{i=1}^{N}(T'_{i,j,k} + PM_j\,.\,Y_{i,j,k}) \le t_k \quad ;\forall j = 1..M, k = 1..K \quad (5.2.4)$$

$$u_{i,j,k} \ge X_{i,j,k} + X_{i,j,k+1} - 1 \quad ;\forall i = 1..N, k = 1..K-1, j = 1..M \quad (5.2.5)$$

$$\sum_{i=1}^{N} u_{i,j,k} \le 1 \quad ;\forall j = 1..M, k = 1..K \quad (5.2.6)$$

$$\sum_{l=k+2}^{K} X_{i,j,l} \le k(1 - X_{i,j,k} + X_{i,j,k+1}) \quad ;\forall i = 1..N, k = 1..K-2, j = 1..M \quad (5.2.7)$$

$$(T'_{i,j,k} + PM_j\,.\,Y_{i,j,k}) \ge (X_{i,j,k-1} + X_{i,j,k+1} - 1)t_k \quad ;\forall i = 1..N, k = 2..K-1, j = 1..M \quad (5.2.8)$$

$$b_{1,j,1} = 0\,,\ y_{1,j,1} = 0 \quad ;\ \forall j = 1..M \quad (5.2.9)$$

$$a_{i,j,k} = b_{i,j,k} + T'_{i,j,k} \quad ;\forall i = 1..N, k = 1..K, j = 1..M \quad (5.2.10)$$

$$b_{i+1,j,k+1} = a_{i,j,k}\,(1 - Y_{i+1,j,k+1}) \quad ;\ \forall i = 2..N, k = 2..K, j = 1..M \quad (5.2.11)$$

$$v_{i,j} \ge \sum_{k=1}^{K} X_{i,j,k}/z_{i,j} \quad ;\forall i = 1..N, j = 1..M \quad (5.2.12)$$

$$\sum_{j=1}^{M} v_{i,j} = 1 \quad ;\forall i = 1..N \quad (5.2.13)$$

$$X_{i,j,k} \in \{0,1\} \quad ;\forall i = 1..N, k = 1..K,\ j = 1..M \quad (5.2.14)$$

$$Y_{i,j,k} \in \{0,1\} \quad ;\forall i = 1..N,\ k = 1..K,\ j = 1..M \quad (5.2.15)$$

$$u_{i,j,k} \in \{0,1\} \quad ;\forall i = 1..N, k = 1..K, j = 1..M \quad (5.2.16)$$

$$v_{i,j} \in \{0,1\} \quad ;\forall i = 1..N, k = 1..K, j = 1..M \quad (5.2.17)$$

$$T'_{i,j,k} \ge 0 \quad ;\forall i = 1..N, k = 1..K, j = 1..M \quad (5.2.18)$$

$$\sum_{k=1}^{K} T'_{i,j,k} \le v_{i,j}\,T_{i,j} \quad ;\forall i = 1..N, j = 1..M \quad (5.2.19)$$

$$\sum_{k=1}^{K} X_{i,j,k} \leq v_{i,j}\, z_{i,j} \qquad ;\forall i = 1..N, j = 1..M \qquad (5.2.20)$$

Les contraintes (5.2.2) - (5.2.4) sont associées aux contraintes de temps de traitement des tâches et au temps des PM lorsqu'il existe (c'est-à-dire $Y_{i,j,k} = 1$). La contrainte (5.2.2) garantit que le temps de traitement total des tâches assignées dans toutes les périodes sur toutes les machines est égal au temps de traitement correspondant. La contrainte (5.2.3) garantit que si la tâche i n'est pas traitée au cours de la période k sur la machine j (c'est-à-dire $X_{i,j,k} = 0$), le temps de traitement réel de la tâche i au cours de la période k sur la machine j doit prendre la valeur 0. La contrainte (5.2.4) exige que le temps de traitement total et le temps PM de toutes les tâches assignées dans une période sur une machine quelconque ne puissent pas dépasser sa durée. La contrainte (5.2.5) spécifie la relation mathématique entre les deux variables de décision $u_{i,j,k}$ et $X_{i,j,k}$. La contrainte (5.2.6) garantit que le traitement des tâches peut s'étendre sur les périodes k et $k + 1$ de la machine j.
Les contraintes (5.2.7) et (5.2.8) sont liées au traitement des tâches ainsi qu'à la contrainte de suivi des PM si une tâche est traitée sur plusieurs périodes.
La contrainte (5.2.7) garantit que si la tâche i est traitée sur une machine quelconque pendant plus d'une période, ces intervalles doivent être continus. Pour être plus précis, pour toutes les périodes k et $k + 1$ adjacentes, $k \in \{1, 2, \dots, K - 2\}$ sur la machine j utilisée pour le traitement de la tâche i, si $X_{i,j,k} = 1$ et $X_{i,j,k+1} = 0$, alors $X_{i,j,l} = 0$ doit être maintenu pour toutes les $l \in \{k + 2, \dots, K\}$ pour assurer la continuité des périodes de traitement de la tâche i.
La contrainte (5.2.8) exige que si une tâche ainsi que la maintenance préventive (MP) sont traitées au cours des périodes $k - 1$ et $k + 1$ sur une machine donnée, lorsqu'il existe une tâche (le temps de MP possible), alors la période intermédiaire k doit être entièrement occupée par la tâche en raison de l'hypothèse de non-préemption.
Les contraintes (5.2.9) précisent l'état initial du système. Les contraintes (5.2.10) et (5.2.11) spécifient l'âge des machines avant et après chaque emploi i, respectivement. La contrainte (5.2.12) assure la cohérence des définitions des variables binaires $X_{i,j,k}$ et $v_{i,j}$. Plus précisément, elle limite que si $X_{i,j,k} = 1$ pour certains i, j et k, alors $v_{i,j} = 1$ doit tenir. Notez que cette contrainte peut également être formulée comme $v_{i,j} \geq X_{i,j,k}$. Qui présente au total des inégalités NMK. Pour la forme actuelle, nous préférons utiliser la contrainte (5.2.12) car elle est constituée d'inégalités NMK et est plus compacte.
La contrainte (5.2.13) garantit que chaque tâche ne peut être traitée que sur une seule machine.
Les contraintes (5.2.14)-(5.2.17) et (5.2.18) sont des contraintes binaires et de non-négativité sur les variables, respectivement.
La contrainte (5.2.19) stipule que si la tâche i n'est pas traitée sur la machine j, à savoir $v_{i,j} = 0$, le temps de traitement total de la tâche i dans toutes les périodes sur la machine j doit être égal à zéro. De même, l'inégalité (5.2.20) précise que si la tâche i n'est pas traitée sur la machine j, alors le nombre total de périodes occupées par la tâche i sur la machine j devrait être égal à zéro.

5.4.3. Résolutions et évaluation de la performance de la 2éme problématique: $\mathbf{Rm|nr - CI - TOU|_{T.Electricity.Cost}}$

Cette partie est consacrée à l'analyse exacte des performances du modèle linéaire correspondant au système étudié. Cependant, le modèle mathématique représente une programmation linéaire pour laquelle une résolution exacte à travers un logiciel commercial de programmation linéaire est nécessaire pour qualifier la complexité et l'état d'optimalité du problème considéré. Afin d'évaluer la puissance de calcul du modèle proposé, le problème doit être examiné dans ses cas les plus difficiles ;

Le tableau 5.5 présente les temps de calcul moyens obtenus à l'aide du logiciel CPLEX 12.6 pour trouver le coût énergétique total optimal des problèmes d'ordonnancement intégré des travaux de production et de maintenance.

Dans tous les cas, les puissances de traitement P sont dérivées de la distribution uniforme $[2,8]$. La durée de la période k est générée aléatoirement à partir de l'ensemble $\{40,80,100\}$, suivie par le temps de maintenance préventive PM est généré aléatoirement à partir de l'ensemble $\{9,12,15\}$ et le prix de l'électricité à la période k est généré aléatoirement à partir de l'ensemble{2,3,5}.

Tableau 5.5. Analyse comparative des résultats obtenus par les différentes instances pour minimiser le coût total d'électricité

Machines × Jobs		PM	T	t	P	C	TEC
7 × 5	Inst. 1	9	[10,50[	40	[2,4[	2	300
	Inst. 2	12	[50,70[	80	[4,6[	3	2400
	Inst. 3	15	[70,100]	100	[6,8]	5	7500
7 × 7	Inst. 1	9	[10,50[	40	[2,4[	2	420
	Inst. 2	12	[50,70[	80	[4,6[	3	3360
	Inst. 3	15	[70,100]	100	[6,8]	5	10500
7 × 12	Inst. 1	9	[10,50[	40	[2,4[	2	960
	Inst. 2	12	[50,70[	80	[4,6[	3	5760
	Inst. 3	15	[70,100]	100	[6,8]	5	18000

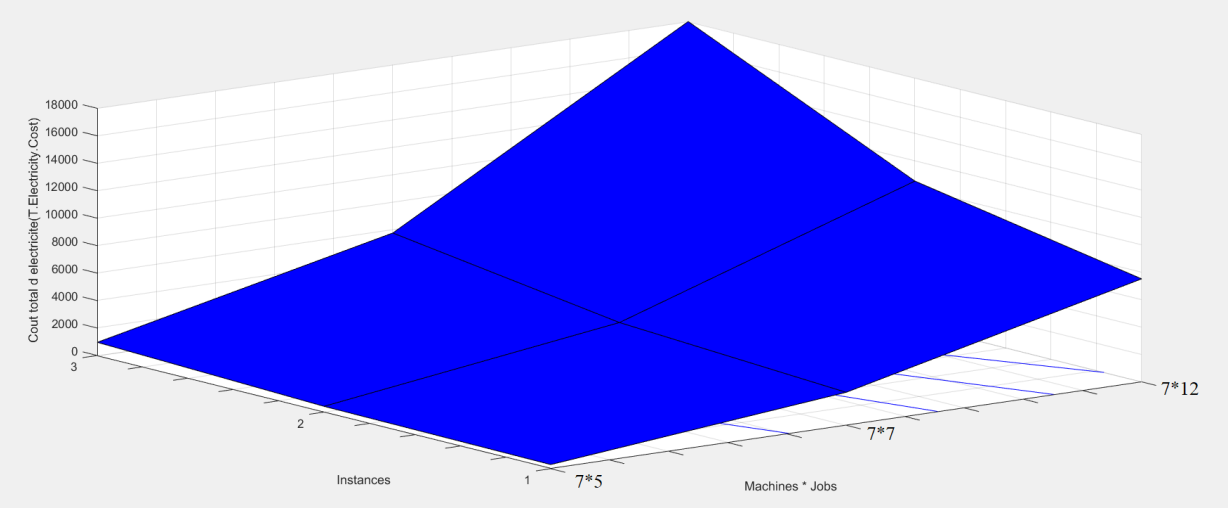

Figure 5.2 : Profils de coût total d'électricité pour les instances étudiées

5.5. Formulation mathématique de la 3ème problématique : Forte pic de consommation du aux usages énergétiques

En 2019, la plus faible demande d'électricité au Québec a été observée le 24 juin à 6 h (12 465 MW), alors que la plus forte demande a été 2,9 fois plus grande. Survenue le 19 janvier à 18 h, elle a atteint 36 252 MW (voir graphique 14). C'est un écart plus grand que celui de 2018, qui était déjà le plus grand écart observé au cours des dix dernières années. La puissance moyenne utilisée (demande horaire moyenne) a été de 21 136 MW, soit 58,3 % de la demande de pointe.

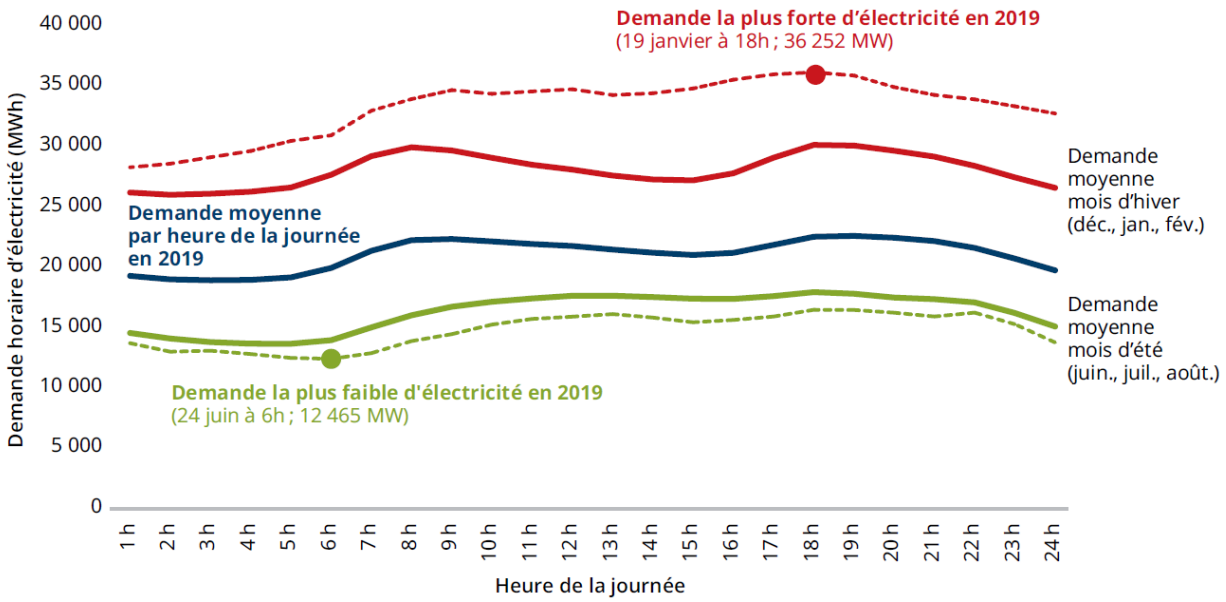

Figure 5.3 : Demande horaire moyenne d'électricité, ainsi que pour les journées de plus forte et plus faible consommation en 2019 [CHA, 2021]

Méthodologie générale : L'opportunité à l'étude est la minimisation de la pointe de consommation énergétique dans le secteur industriel en modifiant les habitudes de consommation des utilisateurs de manière peu invasive. Il est donc essentiel d'agir sur des appareils à haute consommation, qui ne demandent pas d'action humaine en continu.

- **Pour les installations auxiliaires**, la consommation est engendrée par un déclenchement, soit automatique, soit manuel et elle suit une forme fixe avec une durée fixe, et le déclenchement manuel. Lorsque connectés, ces appareils sont contrôlables à distance, cependant comme leur consommation est fixe, seul leur déclenchement peut être contrôlé.
- Cependant **pour le chauffage,** il est possible de contrôler non-seulement le déclenchement mais également la consommation selon les besoins en chauffage. Il est à noter que ces besoins dépendent des utilisateurs, des caractéristiques de l'atelier de production et de la température extérieure.

Ces divers points permettent de traiter le chauffage par la quantité de chauffage utilisée comme une **variable positive** et les autres appareils par le déclenchement en utilisant des **variables binaires**. Le but étant la minimisation du pic de consommation, soit la minimisation de la puissance maximale utilisée dans l'année par un atelier de fabrication au sein de la société Gaspésie Diesel Inc. située à New Richmond du Québec, un modèle d'optimisation est la méthode la plus adaptée. En particulier, ce modèle suit un objectif d'optimisation pour la minimisation de la puissance maximale. Il utilise les

variables précédemment présentées de déclenchements d'appareils et de quantité de chauffage utilisée. Ce modèle est en mesure de réaliser l'optimisation dans le temps. Quant aux choix temporels, deux aspects sont à prendre en compte : la durée d'un intervalle de temps et celle de la période d'optimisation.

Relativement à l'horizon temporel de l'optimisation, une durée d'une journée, soit 24 périodes d'une heure, est la plus appropriée.

Cette section est consacrée à un aperçu du modèle d'optimisation élaboré dans le cadre du présent travail et qui a été utilisé pour la présente enquête. Ce modèle a pour vocation de fournir un aperçu suffisant pour permettre ainsi de le réutiliser et de l'adapter aux travaux ultérieurs. Les paramètres utilisés et les différentes notations seront d'abord présentés, les variables utilisées, suivies des différentes fonctions objectifs, puis des objectifs utilisables ainsi que des contraintes, aussi bien les contraintes réellement imposées dans le contexte du problème que les contraintes artificielles utilisées à des fins mathématiques.

Les indices, paramètres et variables utilisés dans cette formulation sont donnés dans le tableau 5.6 ci-dessous :

Tableau 5.6 : Notations utilisées pour formuler la 3ème problématique étudiée

Ensembles :	
O	Indice des périodes.
i	Indice des installations auxiliaires (Machines CNC, Appareils,…).
t	Indice du temps.
Ensembles :	
$T \in \{1 ; O\}$	Ensemble des périodes d'une heure présente dans une journée.
$I \in \{1 ; m\}$	Ensemble des machines considérés.
$N \in \{-L ; L\}$	Ensemble des temps des déclenchements possibles selon le degré de liberté choisi.
Paramètres :	
$D_{i,t}$	$\begin{cases} 1 & \text{Si la demande de déclenchement de l'appareil i au temps t} \\ 0 & \text{Sinon} \end{cases}$
$C_{i,t,t'}$	Consommation au temps t' engendrée par l'appareil i démarré au temps t.
E_t	Température extérieure au temps t en degrés Celsius.
L	Degré de liberté dans le déplacement des allumages des appareils.
P_t	Prix de la consommation électrique au temps t en $\$/kWh$.
P_{f1}	Prix pour la première tranche de consommation dans le schéma de prix facturant la consommation à prix fixe en $\$/kWh$.
P_{f2}	Prix pour la deuxième tranche de consommation dans le schéma de prix facturant la consommation à prix fixe en $\$/kWh$.
P_c	Prix facturé pour la consommation dans le schéma de prix dual facturant capacité et consommation $\$/kWh$.
P_{fc}	Prix facturé pour la capacité dans le schéma de prix dual facturant capacité et consommation $\$/kW$.

Variables :	
$x_{i,t}$	$\begin{cases}1 & \text{Si le déclenchement de l'appareil i au temps t} \\ 0 & \text{Sinon}\end{cases}$
y_t	Energie de chauffage consommée au temps t en Wh.
j_t	Température intérieure de l'atelier au temps t en degré Celsius.
Variables intermédiaires et artificielles:	
$Soutir_t$	Puissance soutirée au temps t en W.
$Consom_t$	Électricité consommée au temps t en Wh.
z	Puissance maximale soutirée en W ou le pic.

5.5.1. Fonctions objectifs :T. Cost, Pic

Les comportements engendrés par les différents formats de prix considérés sont évalués à l'aide de diverses fonctions objectifs, qui représentent respectivement le prix payé par un utilisateur en fonction d'un format de prix particulier. Ainsi, l'optimisation fournit le comportement optimisé d'un utilisateur permettant d'évaluer si le format de prix est adapté pour créer le comportement souhaité et d'évaluer les résultats qui peuvent être obtenus en optimisant les comportements par rapport à une consommation non-optimisée.

Les trois fonctions visent à minimiser le coût total en $:

5.5.1.1. Fonction coût pour le format de prix sur la consommation fixe

Tarif à prix uniforme :

Dans le premier cas envisagé, il s'agit de la forme actuellement en vigueur au Québec, soit un prix fixe et constant dans le temps par kWh, c'est-à-dire la facturation de l'énergie consommée. Le tarif réel appliqué au Québec est donc utilisé, soit 0,0582 $/kWh pour les 33 premiers kWh et 0,0892 $/kWh pour tous les kWh suivants.

Tableau 5.7 : Tableau des prix avec tarif à prix uniforme

Périodes	Tarifs (§/kwh)
Pour les 33 premiers kWh	0,0582
Pour tous les kWh suivants	0,0892

La fonction de coût du tarif à prix uniforme mentionnée dans les équations suivantes.

$$\textbf{Minimiser}\ \text{Const} \times \text{Prix} - \textbf{Min}\,(\text{Const}, 33)\ \text{Réduction pour premiers kWh} \quad (5.3.1)$$

$$\textbf{Minimiser}\ \left(\frac{\sum_i \sum_t \sum_{t'} x_{i,t} \times C_{i,t,t'}}{12} + \sum_t y_t\right) \times \frac{P_{f2}}{1000} - \textbf{Min}\left(\left(\frac{\sum_i \sum_t \sum_{t'} x_{i,t} \times C_{i,t,t'}}{12} + \sum_t y_t\right), 33\right) \times \frac{P_{f2} - P_{f1}}{1000} \quad (5.3.2)$$

5.5.1.2. Fonction coût pour le format de prix sur la consommation variable

Tarif à prix variable en fonction de l'heure de consommation (Time-Of-Use, « TOU ») :

Un second mode de tarification envisagé est un prix variable en fonction de l'heure de la journée. Cette forme est répandue dans de nombreux pays et est utilisée en Ontario.

Tableau 5.8 : Tableau des prix avec tarif sur consommation variable selon le moment

Périodes	Tarifs (§/kwh)
Hors-pic	6.50
Pic moyen	9.50
Durant le pic	13.2

Les périodes de pic et hors pic varient selon le jour de la semaine et la saison comme suit [RAT, 2021]:

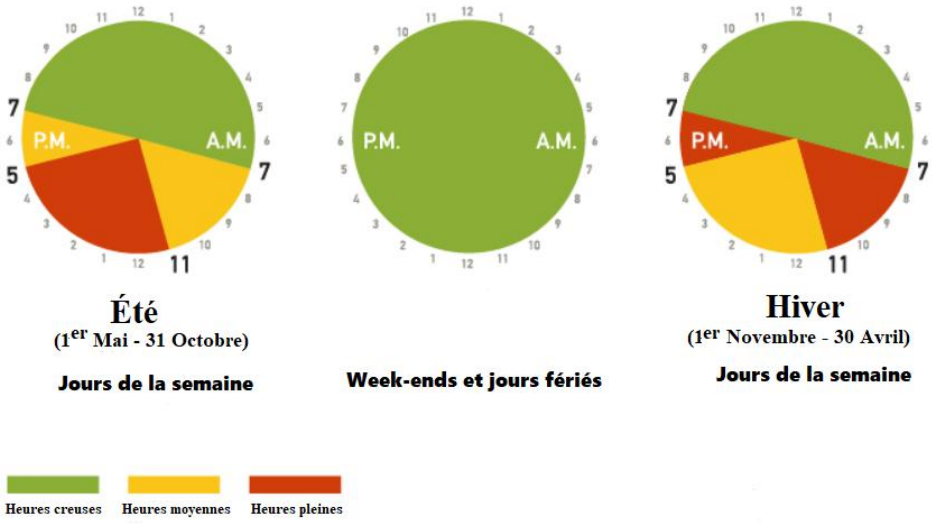

Figure 5.4 : Horaires des périodes de pic pour tarif sur consommation variable selon le moment (Ontario Energy Board)

On s'intéresse en particulier à la situation hivernale et puisque l'on souhaite un prix variable, seul le tarif en vigueur durant la semaine est pertinent. Le modèle utilisera donc le tarif appliqué durant un jour de semaine en hiver en Ontario.

Tableau 5.9 : Tableaux des prix à chaque heure avec tarif sur consommation variable selon le moment

Périodes	Tarifs (§/kwh)
00h00 à 07h00	6.50
07h00 à 11h00	13.2
11h00 à 17h00	9.50
17h00 à 19h00	13.2
19h00 à 00h00	6.50

La fonction de coût du tarif à prix variable en fonction de l'heure de consommation (Time-Of-Use, « TOU ») mentionnée dans l'équation suivante.

$$\textbf{Minimiser } \left(\frac{\sum_i \sum_t \sum_{t'} x_{i,t} \times C_{i,t,t'} \times P_t}{12*1000}\right) + \sum_t y_t \times \frac{P_t}{1000} \qquad (5.3.3)$$

5.5.1.3. Fonction coût pour le format de prix dual facturant consommation et capacité

Tarif considérant la puissance et l'énergie :

Enfin, un troisième mode de tarification est envisagé, qui facture l'énergie consommée en kWh mais aussi la puissance appelée en kW. Ce type de tarification incite les utilisateurs à répartir leur consommation d'énergie dans le temps afin de minimiser la partie capacité de leur facture et donc le pic de consommation d'électricité du côté du fournisseur d'électricité. Son utilisation est pertinente car il est déjà utilisé par Hydro-Québec.

Tableau 5.10 : Tableaux des prix avec tarif sur consommation et puissance

Prix mensuel de capacité ($/kW)	**14,43**
Prix consommation ($/kWh)	0,04970

Dans la mesure où les coûts de capacité sont des coûts mensuels, les coûts facturés pendant une journée correspondent à la puissance soutirée multipliée par $\frac{1}{130}$ème du coût mensuel.

$$\textbf{Minimiser } \left(\frac{\sum_i \sum_t \sum_{t\prime} x_{i,t} \times C_{i,t,t\prime}}{12} + \sum_t y_t\right) \times \frac{P_{fc}}{1000} + Z \times \frac{P_c}{1000} \times \frac{1}{30} \quad (5.3.4)$$

5.5.1.4. Fonction objectif de minimisation du pic

Pour ce qui est de la dernière fonction objectif, qui vise à évaluer si les fonctions objectives précédentes encouragent effectivement les comportements souhaités afin de minimiser la consommation d'énergie de pointe, elle est prise en compte. Cette fonction est donc utilisée pour minimiser le pic de consommation énergétique, soit :

Minimiser Z

5.5.2. Énergie consommée et énergie perdue par le chauffage

Le modèle proposé dans notre cadre de notre étude de cas prévoit la possibilité de chauffer ou non, de surchauffer ou de sous chauffer temporairement et prend en compte la perte de chaleur dans le temps en fonction de la température extérieure.

Afin de chauffer un atelier d'un degré, une certaine quantité d'énergie (en kWh) est nécessaire. Cette quantité dépend de la taille de l'atelier. Par soucis de cohérence, le modèle utilise un local de la taille considérée dans l'article de [ARM, 2009] soit avec une surface de 144 m2, soit un local de 12 m par 12 m. Une hauteur de plafond de 2,5 mètres est utilisée. Ainsi un local classique contient 360 m3 d'air. Cette taille de local considérée par [ARM,] et réutilisée ici peut être confirmée par les statistiques de consommation d'énergie secondaire et émissions de GES par utilisation finale pour le Québec. L'énergie nécessaire pour chauffer un matériau est calculée par la formule suivante : $Q = C_p \times m \times \Delta T$

Soit, $Q = C_{pair} \times V_{air} \times \rho_{air} \times \Delta T$ où Q est la quantité d'énergie nécessaire en kJ, C_p est la chaleur massique de l'élément chauffé (1,0005 pour de l'air à 20°C), m est la masse en kg à chauffer et ΔT la différence entre la température actuelle de l'élément et la température désirée.

Ainsi, une puissance thermique de 1 W entraîne une augmentation de la température de l'air de 1/123 degré Celsius, ce qui signifie que pour chauffer la maison d'un degré, il faut 123 Wh.

En dernier lieu, le chauffage d'une maison ne peut pas être effectué plus rapidement que ne le permet son équipement de chauffage. Ainsi, pour un local de 144 m2, 8 plinthes chauffantes d'une capacité de 1 kW chacune sont considérées comme nécessaires. Cela représente une plinthe chauffante pour 33 m^2 de surface de mur et de plafond, ce qui est une quantité raisonnable. Par conséquent, il est possible d'ajouter 8×1000/12 = 667 Wh d'énergie de chauffage par période de cinq minutes, soit l'équivalent de 8004wh d'énergie de chauffage par période d'une heure.

5.5.3. Températures extérieures pour besoins en chauffage

L'énergie nécessaire pour chauffer un atelier dépend directement de la température extérieure. Il est donc nécessaire d'obtenir des données représentatives de température. La région concernée par l'étude de cas étant le Québec, les données sont collectées et mises à disposition par les sites de Climat Québec et Historique- Météo [HIS, 2020]. La météo du 01 décembre 2020 à Québec est plutôt défavorable. En matinée, il faisait 10°C et le ciel était presque dégagé avec quelques nuages. Cependant, à 12h00, le ciel était nuageux et les températures sont montées à 12°C sur le mois. En fin de journée, les températures ont chuté à 11°C à 19h.

Le 01 décembre 2020 à Québec, la température maximale était de 12°C et la minimale de 10°C.

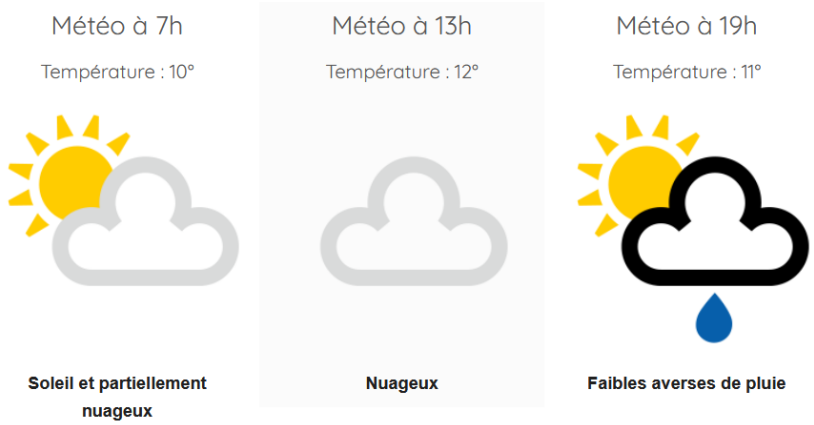

Figure 5.5 : Bulletin météo du 01 décembre 2020 à Ville de Québec

5.5.4. Modélisation du problème : $\mathbf{Rm||_{T.Cost,\ Pic}}$

Le modèle mathématique peut être établi comme suit :

Minimiser Fct Obj (5.3.5)

Sous les contraintes suivantes :

$$\sum_t x_{i,t} = \sum_t D_{i,t} \quad ; \forall\, i \qquad (5.3.6)$$

$$\left(\sum_{n=-L}^{L} x_{i,t+n}\right) * D_{i,t} \geq \left(\sum_{n=-L}^{L} D_{i,t+n}\right) * D_{i,t} \quad ; \forall\, i\,, \forall\, t \in [L+1; 24-L] \qquad (5.3.7)$$

$$\sum_{n=1}^{DC} x_{i,t+n} \leq 1 \qquad ; \forall i, \forall t \in [1; 24-10] \qquad (5.3.8)$$

$$j_t = j_{t-1} + \frac{y_t}{123} - \frac{9}{123} * \max\{0,\ j_{t-1} - E_t\} \qquad ; \forall t \in [2; 24] \qquad (5.3.9)$$

$$j_t \geq 18\ ,\ j_t \leq 24 \qquad ; \forall t \qquad (5.3.10)$$

$$\frac{\sum_t j_t}{24} \geq 20 \qquad (5.3.11)$$

$$y_t \geq 0\ \ ,\ y_t \leq 8 * 1000 * \frac{1}{12} \qquad ; \forall t \qquad (5.3.12)$$

$$\sum_i \sum_t x_{i,t} * C_{i,t,t'} + y_{t'} * 12 \leq Z \qquad ; \forall t' \in T \qquad (5.3.13)$$

$$CAP_{t'} = \sum_i \sum_t x_{i,t} * C_{i,t,t'} + y_{t'} * 12 \qquad ; \forall t' \in T \qquad (5.3.14)$$

$$CONSO_{t'} = \sum_i \sum_t \frac{x_{i,t} * C_{i,t,t'}}{12} + y_{t'} \qquad ; \forall t' \in T \qquad (5.3.15)$$

La contrainte (5.3.6) garantit que pour chaque équipement, la matrice des résultats contient le même nombre de départs que la matrice des demandes. De ce fait, le modèle garantit que la demande d'utilisation de chaque appareil est satisfaite. La contrainte (5.3.7) assure que pour chaque appareil, le modèle permet de décaler le début de L périodes en arrière et de L périodes en avant au maximum. La contrainte (5.3.8) vérifie que pour chaque dispositif, le modèle ne permet pas qu'un dispositif soit déclenché plus d'une fois dans les périodes DC. La variation de la température intérieure est contrôlée par la contrainte (5.3.9) et afin de garder le confort des utilisateurs à un niveau acceptable, le modèle limite les variations de température possible. Ainsi la température intérieure du domicile doit toujours être supérieure à 18°C et inférieure à 24°C. De la même façon, pour ne pas permettre un sous-chauffage permanent à 18°C, le modèle contraint que la température moyenne sur la journée soit 20°C, comme illustré dans les contraintes (5.3.10) et (5.3.11). D'une façon logique, la quantité de chaleur à un atelier en une période d'une heure est limitée par la capacité et le nombre de ses appareils de chauffage. Également, l'ajout de chaleur est toujours positif. Comme présenté dans la section précédente, l'atelier considéré possède 8 plinthes de 1 000 W de capacité, comme illustré dans la contrainte (5.3.12). La contrainte (5.3.13) permet la fixation de la variable artificielle z représentant la puissance soutirée maximale. Les contraintes (5.3.14) et (5.3.15).permettent la fixation de variables intermédiaires pertinentes.

5.5.5. Résolutions et évaluation de la performance de la 3éme problématique: $\mathbf{Rm||_{T.Cost,\ Pic}}$

La figure 5.6 présente les profils de minimisation du pic de puissance soutirée obtenus à l'aide du logiciel CPLEX 12.6 pour résoudre les problèmes d'ordonnancement des usages énergétiques afin de minimiser la demande maximale d'énergie.

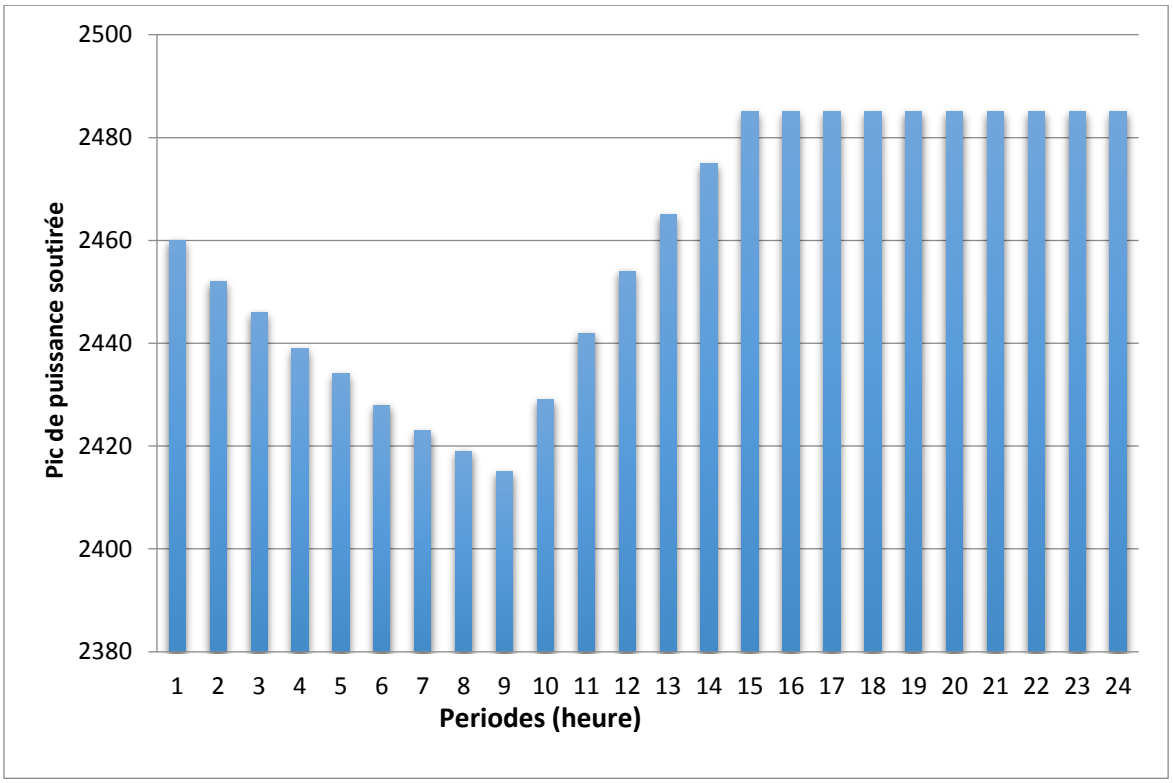

Figure 5.6 : Profils de minimisation du pic de puissance soutirée

5.6. Conclusion

Le présent chapitre propose des solutions aux problèmes d'industrialisation en adoptant une approche plus intelligente et plus ciblée des questions écologiques et environnementales par l'intégration de la technique Dynamic Speed Scaling (DSST) au système étudié où les machines sont échelonnées en fonction de la vitesse. Un modèle MILP est formulé afin d'intégrer cette gestion intelligente dans l'ordonnancement conjoint de la production et de la maintenance en vue d'optimiser la consommation totale d'énergie, par la mise en œuvre d'un programme de gestion de la demande, utilisant le prix comme une mesure d'incitation avec un prix variable par bloc ("taux d'utilisation" ou TOU). Un nouveau modèle d'optimisation des coûts de l'électricité est proposé pour l'ordonnancement intégré des tâches de la production et de la maintenance dans le cadre du système de tarification de l'électricité en fonction de l'heure de consommation (TOU) dans des machines parallèles non liées, dans lesquelles le prix de l'électricité varie tout au long de la journée et par la mise en place d'une gestion des usages énergétiques dans l'atelier afin d'optimiser la demande de pointe. La recherche vise à minimiser la pointe de puissance soutirée par un atelier de production en contrôlant de façon coordonnée les appareils auxiliaires et le chauffage. Un algorithme de contrôle est proposé pour évaluer les résultats atteignables et différents formats de prix pouvant inciter les comportements désirés des consommateurs sont présentés. Les résultats atteignables et la pertinence des formats de prix sont testés sur des données simulées de besoins en appareils auxiliaires et pour les températures de 2020 au Canada. L'évaluation des résultats atteignables montre une baisse du pic de puissance soutirée. L'étude des formats de prix montre qu'un format de prix dual facturant consommation et puissance maximale soutirée est approprié pour inciter le comportement souhaité.

Conclusion générale et perspectives

Le concept d'ordonnancement économe en énergie suscite beaucoup plus d'intérêt qu'auparavant du fait que les réglementations gouvernementales actuelles ont obligé l'industrie à adopter des mesures d'économie d'énergie de sorte que ce secteur a toujours été un gros consommateur d'énergie. À cet égard, notre contribution est amenée à prendre en compte les enjeux d'économie d'énergie dans les décisions d'ordonnancement de la production et de la maintenance.

Dans cette thèse, nous avons soulevé les problèmes d'ordonnancement intégré de la production et de la maintenance sous contraintes d'énergie mono-objectif et multi-objectifs.

Dans un premier temps, nous nous sommes focalisés sur l'étude de l'ordonnancement dans sa globalité en introduisant ses différentes composantes qui vont de la définition des éléments de base des ateliers d'ordonnancement (tâches, ressources, contraintes, critères) à la description de la large gamme d'approches d'optimisation qui sont capables de rendre des solutions de qualité pour ces problèmes considérés, du point de vue de la complexité très difficiles, nous avons rappelé les principales caractéristiques des systèmes d'ordonnancement de production et de maintenance sous contraintes énergétiques et environnementales dans les différents systèmes de production, en passant en revue tous les critères, contraintes et éléments essentiels pour la résolution introduits dans la littérature à ce jour. En outre, nous avons également réalisé une étude bibliographique générale et une analyse comparative afin de fixer les perspectives de notre travail de recherche.

La deuxième contribution se manifeste par l'étude des problèmes d'ordonnancement intégré des tâches de production, de maintenance préventive (PM) et de maintenance corrective (CM) dans une seule machine puis dans l'ateliers flow shop à multi machines afin de minimiser la consommation totale d'énergie (TEC). Des modèles mathématiques correspondants sont établis pour minimiser la consommation totale d'énergie. Nous avons proposé un modèle commun $\mathrm{Sm}|\mathrm{nr}-\mathrm{CI}|_{\mathrm{TEC}}$ afin d'intégrer la maintenance préventive (PM) et corrective (CM) dans l'ordonnancement de la production, où la séquence des tâches de production, ainsi que les périodes de maintenance préventive (PM) et les délais prévus pour l'achèvement des tâches sont établis simultanément; cela rend la théorie mise en pratique plus efficace. Sur la base de la méthode exacte Branch and Bound intégrée sur le solveur CPLEX et de l'algorithme génétique (GA) résolu dans le logiciel Python, les performances du modèle de programmation mixte binaire entier proposé sont testées et évaluées. Ce sont plus que des analyses utilisant le logiciel MATLAB. En effet, après avoir expérimenté numériquement divers paramètres du problème, l'algorithme B&B fonctionne de manière relativement satisfaisante et fournit des résultats précis par rapport à l'algorithme GA. Tandis que pour le cas de plusieurs machines nous avons développé un algorithme de séparation et évaluation. Cette étude a examiné les propriétés de calcul des modèles MILPs développées pour résoudre de manière optimale les problèmes d'ordonnancement intégré des tâches de la production et de la maintenance préventive de durée fixe $\mathrm{Fm}|\mathrm{nr}-\mathrm{FI}|_{\mathrm{TEC}}$ et flexible et $\mathrm{Fm}|\mathrm{nr}-\mathrm{CI}|_{\mathrm{TEC}}$, où l'objectif est de minimiser la consommation totale d'énergie (TEC). Une étude comparative des résultats a prouvé que les modèles développés était suffisamment efficace.

La troisième contribution se concrétise à travers l'étude des problèmes d'ordonnancement conjoint de la production et de la maintenance sous contraintes d'énergie dans un flow shop à deux et à plusieurs machines. Nous avons étudié deux cas d'ordonnancement de permutation et de non-permutation où la séquence de tâche n'est pas nécessairement identique sur toutes les machines: le premier est consacré à la Mise en place d'un ordonnancement écologique des tâches et de périodes de maintenance flexibles dans un atelier de permutation « Flow Shop à deux machines» afin de minimiser le Makespan et la

consommation totale d'énergie. Un modèle linéaire d'optimisation à nombres entiers mixtes $F2|prmu - CIV|_{TEC}$ est fourni pour dériver l'ordonnancement optimal. Le second est relatif à la mise en œuvre de la stratégie Dynamic Speed Scaling (DSS) aux problèmes d'ordonnancement intégré de la production et de la maintenance sous contraintes de deux types d'indisponibilité fixes et flexibles dans l'atelier de non-permutation « Flow Shop à m machines» visant à minimiser la consommation totale d'énergie (TEC). Deux modèles de programmation binaires mixtes en nombres entiers $Fm|nr - FIV|_{TEC}$ et $Fm|nr - CIV|_{TEC}$ sont fournis pour dériver les ordonnancements optimaux, respectivement. Les performances des modèles développés ont été démontrées par une étude approfondie des résultats.

La quatrième contribution se vise à faire progresser le concept d'industrialisation en adoptant une approche plus intelligente et plus ciblée des questions écologiques et environnementales. Notre présence au sein de l'entreprise Martur Fompak INTERNATIONAL répondait au besoin exprimé en vue de résoudre deux problématiques majeures dans l'entreprise ; à savoir une grande consommation d'énergie au niveau de l'atelier de production des sièges et un coût élevé en vigueur dans l'atelier de fabrication des coussins en mousse. Dans un premier temps, nous avons intégré trois aspects, à savoir la production, la maintenance préventive et la prise en compte de l'énergie pour l'atelier flow shop, avec la contrainte de maintenance préventive et la contrainte de demande maximale. Pour les ateliers flowshop avec la contrainte PM et la contrainte de demande de pointe. Un modèle mathématique Un modèle mathématique est établi, et une méta-heuristique basée sur NSGA-II et une méthode de décodage est conçue pour résoudre le modèle de manière efficace. Pour résoudre le modèle de manière efficace. En utilisant cette approche, la frontière de Pareto peut être obtenue pour équilibrer le compromis entre l'objectif économique et l'objectif environnemental. Les résultats numériques montrent que les impacts de la contrainte PM et de la contrainte de demande de pointe doivent être analysés au cas par cas. Cette recherche est étroitement liée à l'application pratique dans les installations industrielles. Les principales implications pratiques peuvent être formulées à partir de quatre points : Premièrement, le problème de la gestion des opérations d'une usine de fabrication est un sujet compliqué qui comporte différents aspects. L'efficacité de la recherche sera réduite si les chercheurs ne se concentrent que sur l'étude théorique d'un seul aspect. La seule façon de combler l'écart entre la théorie et la réalité est d'étudier le problème de l'intégration. En deuxième temps, nous avons intégré la stratégie de la réponse à la demande (DRT) dans un nouveau modèle MILP d'ordonnancement de la production et de la maintenance afin de minimiser les coûts de production, définis comme la somme pondérée des coûts de l'électricité en fonction du temps et les coûts de production liés au temps de réalisation de l'atelier de fabrication des coussins en mousse. Le modèle est proposé afin de résoudre le problème des machines parallèles non liées avec la même date d'échéance et des temps d'inactivité insérés. Deux instances de problèmes d'ordonnancement de machines parallèles non liées ont été testées. La méthode de résolution exacte a permis de réduire 20% du coût total de l'électricité pour l'atelier de fabrication des coussins en mousse.

Comme perspectives de recherche futures, plusieurs pistes nous semblent intéressantes à explorer. Comme première ouverture, nous appliquerons à la nouvelle génération industrielle « Industrie 4.0 » tous les ensembles de techniques d'économie d'énergie développés dans le cadre de l'extension de différents types d'ateliers d'ordonnancement : « Single Machine, Parallel Machines, Flow Shop,…». Dans la mesure où l'industrie 4.0 est une nouvelle approche de l'organisation du processus de fabrication. Cette nouvelle industrie s'affirme comme la convergence du monde virtuel, de la conception numérique, de la gestion (opérationnelle, financière et marketing) avec les produits et objets du monde réel. Grâce aux nouveaux développements des technologies de l'information et de l'informatique industrielle, tels que l'industrie 4.0, l'utilisation d'informations en temps réel dans les décisions relatives à l'ordonnancement de la production et à la maintenance sous contraintes d'énergie devient possible. Le déploiement progressif de l'industrie 4.0 dans les industries a entraîné une augmentation de la quantité d'énergie consommée dans les systèmes industriels pour faire fonctionner diverses machines. En outre,

l'efficacité de calcul de ces systèmes embarqués en temps réel (RTES) dépend uniquement de la réalisation des tâches en temps voulu. L'exécution des tâches de production et de maintenance en réduisant la consommation d'énergie dans des délais critiques constitue un défi pour les concepteurs. Cependant, l'efficacité énergétique et la livraison à temps sont deux objectifs contradictoires, puisque le premier n'est atteint qu'avec un compromis important du second. Dans ce contexte, nous proposons comme poursuite de mon projet de thèse un nouvel organigramme d'ordonnancement efficace en énergie en temps réel (RTEES) du système de production et de maintenance dans l'industrie 4.0 basé sur l'optimisation. Les travaux futurs pourraient se concentrer sur un modèle numérique du problème étudié et sur une approche plus dynamique et analytique de la résolution et du développement du domaine de l'ordonnancement en temps réel dans l'industrie 4.0.

Production scientifique

Publications indexées SCOPUS :

1) **Sadiqi Assia**, El Abbassi Ikram, El Barkany Abdellah and El Biyaali Ahmed, « Comparative analysis the simultaneous scheduling problems of production and maintenance activities », 2018 International Colloquium on Logistics and Supply Chain Management (LOGISTIQUA 2018), 26-27 April 2018, Tangier, Morocco, Date Added to IEEE Xplore: 09 August 2018, Electronic ISSN: 2166-7373, IEEE, DOI: 10.1109/LOGISTIQUA.2018.8428283.

2) **Sadiqi Assia**, El Abbassi Ikram , El Barkany Abdellah and El Biyaali Ahmed, « Joint Scheduling of Jobs and Variable Maintenance Activities in the Flowshop Sequencing Problems: Review, Classification and Opportunities », International Journal of Engineering Research in Africa ,Vol. 39, pp. 170-190, 05 November 2018. DOI: https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/JERA.39.170.

3) **Sadiqi Assia**, El Abbassi Ikram , El Barkany Abdellah and El Biyaali Ahmed, « Non-permutation flow shop scheduling problems with unavailability constraints to Minimize Total Energy Consumption », 2019 5th International Conference on Optimization and Applications (ICOA) .2019 - DOI: 10.1109/ICOA.2019.8727649.

4) **Sadiqi Assia**, El Abbassi Ikram, El Barkany Abdellah and El Biyaali Ahmed, "A batch sizing and Joint Scheduling Problem of Jobs and Variable Maintenance Activities under energy constraints ", la 12^{éme} édition du colloque international de la Logistique et le Supply Chain Mnagement « LOGISTIQUA », l'IUT de Montreuil – Université Paris 8 – France les 12-13 et 14 juin 2019. DOI: 10.1109/LOGISTIQUA.2019.8907311.

5) **Sadiqi Assia**, El Abbassi Ikram, El Barkany Abdellah, Darcherif Moumen, El Biyaali Ahmed, Abdelouahhab Jabri, Moumen Darcherif, « Optimizing electricity costs during integrated scheduling of jobs and stochastic preventive maintenance under time-of-use electricity tariffs», Management and Production Engineering Review, Volume 10, Number 4, pp. 123–132, 31 December 2019. DOI: https://doi.org/10.24425/mper.2019.131452.

6) **Assia, S.,** El Abbassi, I., El Barkany, A., Darcherif, M., & El Biyaali, A. (2020). Green Scheduling of Jobs and Flexible Periods of Maintenance in a Two-Machine Flowshop to Minimize Makespan, a Measure of Service Level and Total Energy Consumption. Advances in Operations Research, 2020, 1–9. DOI:10.1155/2020/9732563.

7) **Sadiqi Assia**, El Abbassi Ikram, El Barkany Abdellah, Darcherif Moumen, El Biyaali Ahmed, Speed scaling technique integrated in scheduling of production and maintenance under energy constraints using genetic algorithms, E3S Web Conf. 170 01029 (2020). DOI: 10.1051/e3sconf/202017001029.

8) **Sadiqi Assia**, El Abbassi Ikram, El Barkany Abdellah, Darcherif Moumen, El Biyaali Ahmed, "A GENETIC ALGORITHM AND B&B ALGORITHM FOR INTEGRATED PRODUCTION SCHEDULING, PREVENTIVE AND CORRECTIVE MAINTENANCE TO SAVE ENERGY", Management and Production Engineering Review, Volume 11, Number 4, December 2020, pp. 138–148. DOI: 10.24425/mper.2020.136128.

9) **Sadiqi Assia**, El Abbassi Ikram, El Barkany Abdellah, Darcherif Moumen, « « Real-Time Energy Efficient Scheduling of Jobs and Maintenance in the Industry 4.0», IEEE- International Symposium on Advanced Electrical and Communication Technologies (ISAECT2020). (Accepté en 2021, En production).

10) **Sadiqi Assia**, El Abbassi Ikram, El Barkany Abdellah, Darcherif Moumen and El Biyaali Ahmed, « Energy-efficient Scheduling problems with Diverse Maintenance Activities: Energy minimization», Engineering Journal (Article en cours de révision).

Communications orales :

1) **Assia Sadiqi**, Abdellah El Barkany, Ahmed El Biyaali, « Models for simultaneous scheduling of production and maintenance of varying lengths: Literature review», International Conference on Technology, Engineering & Mathematics (TEM2018), Kenitra, Morocco, March 26-27 2018.

2) **Sadiqi Assia**, El Abbassi Ikram, El Barkany Abdellah and El Biyaali Ahmed, « Comparative analysis the simultaneous scheduling problems of production and maintenance activities », 2018 International Colloquium on Logistics and Supply Chain Management (LOGISTIQUA 2018), 26-27 April 2018, Tangier, Morocco, Date Added to IEEE Xplore: 09 August 2018, Electronic ISSN: 2166-7373, IEEE, DOI: 10.1109/LOGISTIQUA.2018.8428283 (Indexed in SCOPUS)

3) **Sadiqi Assia**, El Abbassi Ikram, El Barkany Abdellah, El Biyaali Ahmed and Mahmoudi Morad, « Mixed- integer linear programming models for scheduling under energy constraints and different resources: Computational Comparison », 5ème Symposium International Energie et Villes de Futur (EVF 2018), Fès, Maroc, 25-26 Octobre 2018.

4) **Sadiqi Assia**, El Abbassi Ikram, El Barkany Abdellah and El Biyaali Ahmed, « Modèle d'ordonnancement sous contraintes d'énergie et d'indisponibilité de la machine », International Meeting on Advanced Technologies in Energy and Electrical Engineering (IMAT3E'18), Fez, Marocco, 22-23 November 2018, http://doi.org/10.5339/qproc.2019.imat3e2018.21 (E3S Web Conf. / QScience).

5) **Sadiqi Assia**, El Abbassi Ikram, El Barkany Abdellah and El Biyaali Ahmed, "Two-Machine Job Shop Problem Under Availability Constraints on one machine: Total Energy Consumption (TEC) minimization", The 1st International Online Conference on Nanoscience and Nanotechnology (N@NO'2018), Johannesburg, South Africa, 29-30 December 2018.

6) **Sadiqi Assia**, El Abbassi Ikram , El Barkany Abdellah and El Biyaali Ahmed, "A Proactive Approach to Solve Integrated Production Scheduling and Maintenance Planning Problem in Flow Shops to Minimize Total Energy Consumption (TEC)", The 1st International Online Conference on Nanoscience and Nanotechnology (N@NO'2018), Johannesburg, South Africa, 29-30 December 2018.

7) **Sadiqi Assia**, El Abbassi Ikram , El Barkany Abdellah and El Biyaali Ahmed, "Integrated Production and Preventive Maintenance Scheduling for a Single Machine with Failure Uncertainty to Minimize Total Energy Consumption", The 1st International Online Conference on Nanoscience and Nanotechnology (N@NO'2018), Johannesburg, South Africa, 29-30 December 2018.

8) **Sadiqi Assia**, El Abbassi Ikram , El Barkany Abdellah and El Biyaali Ahmed, « Non-permutation flow shop scheduling problems with unavailability constraints to Minimize Total Energy Consumption », 2019 5th International Conference on Optimization and Applications (ICOA) .2019 - 10.1109/ICOA.2019.8727649.

9) **Sadiqi Assia**, El Abbassi Ikram, El Barkany Abdellah and El Biyaali Ahmed, "A batch sizing and Joint Scheduling Problem of Jobs and Variable Maintenance Activities under energy constraints ", la 12éme édition du colloque international de la Logistique et le Supply Chain Mnagement « LOGISTIQUA », l'IUT de Montreuil – Université Paris 8 – France les 12-13 et 14 juin 2019.

10) **Sadiqi Assia**, El Abbassi Ikram , El Barkany Abdellah, Darcherif Moumen and El Biyaali Ahmed, « A genetic algorithm for scheduling problems of production and maintenance jobs under energy constraints », The 11th edition of the International Conference on Integrated Design and Production is organized October the 14th- 16th October 2019 at Fez, Morroco (CPI2019).

11) **Sadiqi Assia**, El Abbassi Ikram , El Barkany Abdellah, Darcherif Moumen and El Biyaali Ahmed, « Speed Scaling Technique Integrated in Scheduling of Production and Maintenance Under Energy Constraints using Genetic Algorithms», 6th International conference on Energy and City of the future (EVF'2019).

12) **Sadiqi Assia**, El Abbassi Ikram, El Barkany Abdellah, Darcherif Moumen, « Real-Time Energy Efficient Scheduling of Jobs and Maintenance in the Industry 4.0», IEEE- International Symposium on Advanced Electrical and Communication Technologies (ISAECT2020). November 25th – 27th , 2020, Ibn Tofail University, Morocco, Morocco.

13) **A. SADIQI**, I. El ABBASSI, A. El BARKANY, M. DARCHERIF, M. ARINATE, « ORDONNANCEMENT DES TACHES DE LA PRODUCTION ET DE LA MAINTENANCE SOUS CONTRAINTES ENERGETIQUES : ÉTUDE DE CAS», Journée Nationale de Modélisation et Optimisation des Systèmes (JNMOS'2020), 16 décembre 2020, Morocco.

Bibliographie

[ABA, 1996] Abadi, I. N. K., Hall, N. G., & Sriskandarajah, C., "Minimizing Cycle Time in a Blocking Flowshop", Operations Research, 48(1), 177–180, 1996.

[AGG, 2002] Aggoune, R., "Ordonnancement d'ateliers sous contraintes de disponibilité des machines", These de doctorat, Universite de Metz, France, 2002.

[AGG, 2004] Aggoune, R., "Minimizing the Makespan for the Flow Shop Scheduling Problem with Availability Constraints", Eur. J. Oper. Res, 153(3), pp. 534–543, 2004.

[AGG, 2006] Aggoune, R., & Portmann, M.C., "Flow Shop Scheduling Problem with Limited Machine Availability: A Heuristic Approach", Int. J. Prod. Econ, 99, pp. 4–15, 2006.

[ALB, 2012] Alberto P. S. and Marco T., "Integrated maintenance and production planning: A model to include rescheduling costs", Journal of Quality in Maintenance Engineering. V : 18 (1), pp .42-59, 2012.

[ALD, 2004] Aldowaisan, T., & Allahverdi, A., "New heuristics for m-machine no-wait flowshop to minimize total completion time", Omega, 32(5), pp. 345–352, 2004.

[ARM, 2009] Armstrong, M. M., Swinton, M. C., Ribberink, H., Beausoleil-Morrison, I., & Millette, J. Synthetically derived profiles for representing occupant-driven electric loads in Canadian housing. Journal of Building Performance Simulation, 2(1), 15-30, 2009.

[ASH, 2001] Ashok, S., & Banerjee, R.. An optimization mode for industrial load management. IEEE T. Power System. Vol. 16, No. 4, pp. 879-884,2001.

[ASH, 2006] Ashok, S. Peak-load management in steel plants. Applied Energy, Vol. 83, No. 5, pp. 413-424, 2006.

[BAK, 2010] Baker, K. R., & Keller, B., "Solving the single-machine sequencing problem using integer programming", Computers & Industrial Engineering, 59(4), pp. 730-735, 2010.

[BAM, 2012] Bampis, E., Dürr, C., Kacem, F., & Milis, I., "Speed scaling with power down scheduling for agreeable deadlines. Sustainable Computing: Informatics and Systems", 2(4), pp.184-189, 2012.

[BEG, 2013] Bego, A., Li, L., & Sun, Z. Identification of reservation capacity in critical peak pricing electricity demand response program for sustainable manufacturing systems. International Journal of Energy Research, Vol. 38, No. 6, pp. 728-736, 2013.

[BEM, 2002] Bembla, M., "Ordonnancement conjoint production et mainten ance : Critere et heuristique de resolution ", Memoire de dea, U.F.R des Sciences et Techniques de l'Universite de Franche Comte, 2002.

[BEN, 2005] Benbouzid S. F., "Contribution a l'etude de la performance et de la robustesse des ordonnancements conjoints Production/Maintenance : Cas du Flow shop", These de doctorat, en Automatique et Informatique. UFR des Sciences et Techniques de l'Universite de Franche-Comte, France, 2005.

[BRA, 1996] Brandolese, M., Franci, M., & Pozzetti, A., "Production and maintenance integrated planning", International Journal of production Research, 34(7),pp. 2059–2075, 1996.

[Breit, 2004] Breit, J., "An Improved Approximation Algorithm for Two-Machine Flow Shop Scheduling with an Availability Constraint",Inf. Process. Lett, 90(6), pp. 273–278, 2004.

[CAP, 2013] Capros, P., Devita, N., Tasios, D., Papadopoulos, P., Siskos, E., & Havlik, P., "Eu energy, transport and ghg emissions trends to 2050", Publications Office of the European Union: European Commission, 2013.

[CAR, 1988] CARLIER, P. CHRETIENNE, "Problèmes d'Ordonnancement : Modélisation, Complexité, Algorithmes" (330 pages), MASSON, Collection Etudes et Recherches en Informatique, Janvier 1988.

[CHA, 2005] Chao, X., & Chen, F.-Y. An optimal production and shutdown strategy when a supplier offers an incentive program. Manufacturing Service Operations Management. Vol. 7, No. 2, pp. 130-143, 2005.

[CHA, 2008] Chao, X., & Zipkin, P.-H. Optimal policy for a periodic-review inventory under a supply capacity contract. Operations Research. Vol. 56, No. 1, pp. 59-68,2008.

[CHA, 2021] Chaire de gestion du secteur de l'énergie, HEC Montréal, 3000, chemin de la Côte-Sainte-Catherine, Montréal (Québec) H3T 2A7 Canada 2021.

[CHE, 2000] Cheng, T.C.E., &Wang, G., "An Improved Heuristic for Two-Machine Flowshop Scheduling with an Availability Constraint", Operations Research Letters, 26(5), pp. 223–229, 2000.

[CHE, 2006a] Chen, J. S., "Optimization models for the machine scheduling problem with a single flexible maintenance activity", Engineering Optimization, 38(1), pp. 53–71, 2006a.

[CHE, 2006b] Chen, J. S., "Single machine scheduling with flexible and periodic maintenance", Journal of the Operational Research Society, 57(6), pp. 703–710, 2006b.

[CHE, 2015] Che, A., Lv, K., Levner, E., Kats, V., "Energy consumption minimization for single machine scheduling with bounded maximum tardiness", In: Networking, Sensing and Control (ICNSC), 2015 IEEE 12th International Conference on. IEEE, pp. 146-150, 2015.

[CHE, 2017] Che, A., Wu, X., Peng, J., & Yan, P., "Energy-efficient bi-objective single-machine scheduling with power-down mechanism", Comput. Oper. Res, 85, pp. 172–183,2017.

[CHI, 2011] Chihaoui, F.B., Kacem, I., Hadj-Alouane, A.B., Dridi, N., & Rezg, N., "No-Wait Scheduling of a Two-Machine FlowShop to Minimise the Makespan under Non-Availability Constraints and Different Release Dates", Int. J.Prod. Res, 49, pp. 6273–6286, 2011.

[CLA, 1999] Clausen, J., "Branch and bound algorithms – Principles and examples", Department of Computer Science, University of Copenhagen, 1(30), 1999.

[COM, 2011] Commission, E., "Energy Roadmap 2050", COM(2011) 885 final, 15(12), 2011.

[COU, 2000] Coudert T., "Apport des systemes multi-agents pour la negociation en ordonnancement : application aux fonctions production et maintenance", These de doctorat soutenue a l'ENI de Tarbes, France, 2000.

[CUI, 2016] Cui, W., Lu, Z., Zhou, B.H., Li, C., & Han, X., "A hybrid genetic algorithm for non-permutation flow shop scheduling problems with unavailability constraints", Int. J. Comput. Integr. Manuf, 29, pp.1–18, 2016.

[CUI, 2019] Cui, W., Sun, H., & Xia, B., "Integrating production scheduling, maintenance planning and energy controlling for the sustainable manufacturing systems under TOU tariff", Journal of the Operational Research Society, 71(11), pp. 1760–1779, 2019.

[CUI, 2019] Cui, W., Sun, H., & Xia, B., "Integrating production scheduling, maintenance planning and energy controlling for the sustainable manufacturing systems under TOU tariff", Journal of the Operational Research Society, 71(11), pp. 1760–1779, 2019.

[DAB, 2016] Dababneh, F., Li, L., &Sun, Z., "Peak power demand reduction for combined manufacturing and HVAC system considering heat transfer characteristics", Int. J. Prod. Econ, 177, pp. 44–52, 2016.

[DAI, 2013] Dai, M., Tang, D., Giret, A., Salido, M. A., & Li, W. D., " Energy-efficient scheduling for a flexible flow shop using an improved genetic-simulated annealing algorithm", Robotics and Computer-Integrated Manufacturing, 29(5), pp. 418-429, 2013.

[DAI, 2019a] Dai, M., Tang, D., Giret, A., & Salido, M.A., "Multi-objective optimization for energy-efficient flexible job shop scheduling problem with transportation constraints", Robot. Comput. Integr", Manuf, 59, pp.143–157, 2019.

[DAI, 2019b] Dai, M., Zhang, Z., Giret, A., & Salido, M.A., "An Enhanced Estimation of Distribution Algorithm for Energy-efficient Job-Shop Scheduling Problems with Transportation Constraints", Sustainability, 11, pp. 3085, 2019.

[DEB, 2000] Deb, K., Agrawal, S., Pratap, A., & Meyarivan, T.,"A fast elitist non-dominated sorting genetic algorithm for multi-objective optimization: NSGA-II", In Proceedings of the parallel problem solving from nature VI (PPSN-VI) conference, pp. 849–858, 2000.

[DEB, 2002] Deb, K., Agrawal, S., Pratap, A., & Meyarivan, T., "A fast and elitist multi-objective genetic algorithm: NSGAII.IEEE Transactions on Evolutionary Computation", 6, pp.182–197, 2002.

[DIE, 2010] Diévart, M.,"Architectures de diagnostic et de pronostic distribuées de systèmes techniques complexes de grande dimension", PhD thesis, Institut National Polytechnique de Toulouse, 2010.

[DIN, 2016b] Ding, J. Y., Song, S. J., & Wu, C., "Carbon-efficient scheduling of flow shops by multi-objective optimization", European Journal of Operational Research, 248(3), pp. 758-771, 2016b.

[FAN, 2011] Fang, K., Uhan, N., Zhao, F., Sutherland, J.W.,"A new approach to scheduling in manufacturing for power consumption and carbon footprint reduction", J. Manuf. Syst. 30 (4), pp. 234-240, 2011.

[FAN, 2013] Fang, K., Uhan, N.A., Zhao, F., & Sutherland, J.W., "Flow shop scheduling with peak power consumption constraints", Ann. Oper. Res, 206, pp. 115–145, 2013.

[FAN, 2016] Fang, K., Uhan, N. A., Zhao, F., & Sutherland, J. W., "Scheduling on a single machine under time-of-use electricity tariffs", Annals of Operations Research, 238(1-2), pp.199-227, 2016.

[FER, 2013] Fernandez, M., Li, L., & Sun, Z. Just-For-Peak buffer inventory for peak electricity demand reduction of manufacturing systems. International Journal of Production Economics, Vol.146, No. 1., pp. 178-184, 2013.

[FUY, 2019] Fu, Y., Tian, G., Fathollahi-Fard, A.M., Ahmadi, A., & Zhang, C., "Stochastic multi-objective modelling and optimization of an energy-conscious distributed permutation flow shop scheduling problem with the total tardiness constraint", J. Clean. Prod, 226, pp. 515–525, 2019.

[GAH, 2016] Gahm C., Denz F., Dirr M., & Tuma A.,"Energy - efficient scheduling in manufacturing companies : a review and research framework", European Journal of Operational Research, 248(3), pp. 744-757, 2016.

[GIR, 2015] Giret, A., Trentesaux, D., & Prabhu, V., "Sustainability in manufacturing operations scheduling: a state of the art review", Journal of Manufacturing Systems, 37(1), pp. 126-140, 2015.

[GOL, 2010] Goldman, C., Reid, M., Levy, R., & Silverstein, A., "Coordination of energy efficiency and demand response", Ernest Orlando Lawrence Berkeley National Laboratory, Environmental Energy Technologies Division, 2010.

[GOR, 2008] Goren, S., & Sabuncuoglu, I.," Robustness and stability measures for scheduling single-machine environment", IIE Transactions, 40, pp. 66–83, 2008.

[GRA, 1979] Graham, R.L., Lawler, E.L. & Rinnooy Kan, A.H.G., "Optimization and approximation in deterministic sequencing and scheduling : a survey", Annals of Discrete Mathematics, 5, pp. 287-326, 1979.

[GRA, 1999] Graves, G. H., & Lee, C. Y., "Scheduling maintenance and semi-resumable jobs on a single machine", Naval Research Logistics, 46(7), pp. 845–863, 1999.

[HAD, 2005] Hadda, H., "A note on "Simultaneously scheduling n jobs and the preventive maintenance on the two-machine flow shop to minimize the makespan." International Journal of Production Economics, 159, pp. 221–222, 2005.

[HAD, 2010] Hadda, H., Dridi, N., & Hajri-Gabouj, S., " An Improved Heuristic for Two-Machine Flowshop Scheduling with an Availability Constraint and Nonresumable Jobs", 4or-Q J. Oper. Res, 8(1), pp. 87–99, 2010.

[HIS, 2020] https://www.historique-meteo.net/amerique-du-nord/quebec/ville-de quebec/2020/12/01/

[HOO, 2005] Hoogeveen, H. Multicriteria scheduling, "European Journal of Operational Research", 167, pp.592-623, 2005.

[JER, 2012] Jérémy, B., & Sebastian, T., "Versuneestimationdel'énergiedefabricationd'un produitdès sa conception", 13èmeColloque National AIP-PRIMECA. Le Mont-Dore,France, 2012.

[JIA, 2019] Jiang, E., &Wang, L., "An improved multi-objective evolutionary algorithm based on decomposition for energy-effcient permutation flow shop scheduling problem with sequence-dependent setup time", Int. J. Prod. Res, 57, pp. 1756–1771, 2019.

[KAC, 2003] I. Kacem, "Ordonnancement multicritère des job-Shop flexibles : formulation, bornes inférieures et approche évolutionniste coopérative", Thèse de Doctorat, Université des Sciences et Techniques de Lille1, 2003.

[Kub, 2002] Kubiak, W., Błażewicz, J., Formanowicz, P., Breit, J., & Schmidt, G., "Two-machine flow shops with limited machine availability", European Journal of Operational Research, 136(3), pp. 528–540, 2002.

[LEE, 1997] Lee, C.Y., "Minimizing the Makespan in the Two-Machine Flowshop Scheduling Problem with an Availability Constraint", Oper. Res. Lett. 1997, 20(3), pp. 129–139, 1997.

[LEE, 2000] Lee, C. Y., & Chen, Z. L., "Scheduling jobs and maintenance activities on parallel machines". Naval Research Logistics, 47, pp.145–165, 2000.

[LEI, 2018] Lei, D., Gao, L., & Zheng, Y., "A novel teaching-learning-based optimization algorithm for energy-efficient scheduling in hybrid flow shop", IEEE Trans. Eng. Manag, 65, pp. 330–340, 2018.

[LEW, 2007] Lewis, G. Strategies to Increase California Food Processing Industry Demand Response Participation: a Scoping Study. Lawrence Berkeley National Laboratory, CA, U.S, 2007.

[LI, 2011] W. Li, A. Zein, S. Kara, C. Herrmann, An Investigation into Fixed Energy Consumption of Machine Tools, in, Springer Berlin Heidelberg, Berlin, Heidelberg, 2011, pp. 268-273.

[LIJ, 2018] Li, J.Q., Sang, H.Y., Han, Y.Y., Wang, C.G., & Gao, K.Z., "Efficient multi-objective optimization algorithm for hybrid flow shop scheduling problems with setup energy consumptions", J. Clean. Prod, 181, pp. 584–598, 2018.

[LIM, 2019] Li, M., Lei, D., & Cai, J., "Two-level imperialist competitive algorithm for energy-efficient hybrid flow shop scheduling problem with relative importance of objectives. Swarm Evol", Comput, 49, pp. 34–43, 2019.

[LIN, 2015] Lin, W., Yu, D.Y., Zhang, C., Liu, X., Zhang, S., Tian, Y., Liu, S., & Xie, Z., "A multi-objective teaching-learning-based optimization algorithm to scheduling in turning processes for minimizing makespan and carbon footprint", J. Clean. Prod, 101, pp. 337–347, 2015.

[LIU, 2013] Liu, Y., Lohse, N., Petrovic, S., & Gindy, N., "An Investigation into Minimising Total Energy Consumption, Total Energy Cost and Total Tardiness Based on a Rolling Blackout Policy in a Job Shop", Advances in Production Management Systems. Competitive Manufacturing for Innovative Products and Services, pp. 103–110, 2013.

[LIU, 2014] Liu, C.G., Yang, J., Lian, J., Li, W., Evans, S., & Yin, Y., "Sustainable performance oriented operational decision-making of single machine systems with deterministic product arrival time", J. Clean. Prod, 85, pp. 318–330, 2014.

[LIU, 2014] Liu, Y., Dong, H., Lohse, N., Petrovic, S., & Gindy, N., "An investigation into minimising total energy consumption and total weighted tardiness in job shops", J. Clean. Prod, 65, pp.87–96, 2014.

[LIU, 2014a] Liu, Y., Dong, H., Lohse, N., Petrovic, S., & Gindy, N., "Une enquête sur la réduction de la consommation totale d'énergie et du retard total pondéré dans les ateliers", Journal of Cleaner Production, 65, pp.87-96, 2014a.

[LIU, 2016] Liu, Y., Dong, H., Lohse, N., Petrovic, S.," A multi-objective genetic algorithm for optimisation of energy consumption and shop floor production performance. Int. J. Prod. Econ. 2016, 179, 259–272.

[LOP, 2001] Lopez, P. & Roubellat, F., "Ordonnancement de la production", Paris: Hermès science publications, 2001

[LUC, 2017] Lu, C., Gao, L., Li, X., Pan, Q., & Wang, Q., "Energy-efficient permutation flow shop scheduling problem using a hybrid multi-objective backtracking search algorithm", J. Clean. Prod, 144, pp. 228–238, 2017.

[LUO, 2019] Luo, S., Zhang, L., & Fan, Y., "Energy-efficient scheduling for multi-objective flexible job shops with variable processing speeds by grey wolf optimization", J. Clean. Prod, 234, pp.1365–1384, 2019.

[MAN, 1960] Manne, A.S. 1960. "On the Job-Shop Scheduling Problem." Operations Research 8: 219–223. doi:10.1287/opre.8.2.219.

[MAN, 2016] Mansouri, S.A., Aktas, E., & Besikci, U., "Green scheduling of a two-machine flowshop: Trade-o_ between makespan and energy consumption", Eur. J. Oper. Res, 248, pp. 772–788, 2016.

[MAS, 2013] Mashaei, M., & Lennartson, B., "Energy Reduction in a Pallet-Constrained Flow Shop Through On-Off Control of Idle Machines", Ieee Transactions on Automation Science and Engineering, 10, pp.45-56, 2013.

[MEN, 2018] Meng, L., Zhang, C., Shao, X., Ren, Y & Ren, C., "Mathematical modelling and optimisation of energyconscious hybrid flow shop scheduling problem with unrelated parallel machines", Int. J. Prod. Res., pp.1-27, 2018.

[MER, 2015] Merkert, L., Harjunkoski, I., Isaksson, A., Saynevirta, S., Saarela, A., & Sand, G., "Scheduling and energy-industrial challenges and opportunities. Computers and Chemical Engineering", 72, pp.183-198, 2015.

[MOS, 2009] Mosheiov, G., & Sarig, A., "Scheduling a maintenance activity to minimize total weighted completiontime", Computers & Mathematics with Applications, 57, pp. 619–623, 2009.

[MOU, 2006] Mourani, I.,"Étude des systèmes de productions automatisée soumis à des aléas ", PhD thesis, Université Paul Verlaine-Metz, 2006.

[MOU, 2007] Mouzon, G., Yildirim, M.B., Twomey, J., "Operational methods for minimization of energy consumption of manufacturing equipment", Int. J. Prod. Res. 45 (18e19), pp. 4247-4271, 2007.

[MOU, 2008] Mouzon, G., Yildirim, M.B., "A framework to minimise total energy consumption and total tardiness on a single machine", Int. J. Sustain. Eng. 1 (2), pp.105-116, 2008.

[MOU, 2018] Mouzon, G., "Méthodes et modèles opérationnels pour la minimisation de la consommation d'énergie dans un environnement manufacturier", Thèse de doctorat, Université d'État de Wichita, Wichita, États-Unis d'Amérique, 2018.

[NAG, 2015] Nagasawa, K., Ikeda, Y., & Irohara, T., "Robust flow shop scheduling with random processing times for reduction of peak power consumption", Simul. Model. Pract. Theory, 59, pp. 102–113, 2015.

[OSM, 1989] M.L. Smith, R.A. Dudek, "A general algorithm for solution of the n-job, m-machine sequencing problem of the flowshop", Oper Res, 15 (1), pp. 71–82, 1967.

[PAC, 2014] Pach, C., Berger, T., Sallez, Y., Bonte, T., Adam, E., Trentesaux, D., "Reactive and energy-aware scheduling of flexible manufacturing systems using potential fields", Comput. Ind. 65 (3), pp. 434-448, 2014.

[PAR, 1985] Parunak, H.V.D., "Manufacturing experience with the contract net. In Proceedings of the Fith Workshop on Distributed Artificial Intelligence", 1985.

[PUG, 2003] Pugazhendhi, S., Thiagarajan, S., Rajendran, C., & Anantharaman, N., "Performance enhancement by using nonpermutation schedules in flowline-based manufacturing systems," Computers & Industrial Engineering, vol. 44, no. 1, pp. 133–157, 2003.

[RAP, 2013] Rapine, C., "Scheduling of a Two-Machine Flowshop with Availability Constraints on the First Machine", Int. J. Prod. Econ, 142, pp. 211–212, 2013.

[RAT, 2021] https://www.oeb.ca/rates-and-your-bill/electricity-rates/managing-costs-time-use-rates, 2021.

[ROD, 1988] F.A. Rodammer et K. Preston White, "A recent survey of production scheduling", IEEE Transaction on Systems, Man and Cybernetics, pp. 6-18, 1999.

[ROY, 1993] Roy, B., & Bouyssou, D., "Aide multicritère à la décision: méthodes et cas", Paris: Economica, p. 695, 1993.

[SAD, 2018a] Sadiqi, A., El Abbassi, I., El Barkany, A., & El Biyaali, A., "Comparative analysis the simultaneous scheduling problems of production and maintenance activities", 2018 International Colloquium on Logistics and Supply Chain Management (LOGISTIQUA), 26-27 April 2018.

[SAD, 2018b] Sadiqi, A., El Abbassi, I., El Barkany, A., & El Biyaali, A., "Joint Scheduling of Jobs and Variable Maintenance Activities in the Flowshop Sequencing Problems: Review, Classification and Opportunities", International Journal of Engineering Research in Africa, 39, pp. 170-190, 2018.

[SAD, 2019a] Sadiqi, A., El Abbassi, I., El Barkany, A., & El Biyaali, A., "Non-permutation flow shop scheduling problems with unavailability constraints to Minimize Total Energy Consumption", 5th International Conference on Optimization and Applications (ICOA 2019), 25-26 April 2019.

[SAD, 2019b] Sadiqi, A., El Abbassi, I., El Barkany, A., & El Biyaali, A., "A batch sizing and Joint Scheduling Problem of Jobs and Variable Maintenance Activities under energy constraints", IEEE, 12th

International Colloquium of Logistics and Supply Chain Management (LOGISTIQUA 2019), June, 12-14, 2019.

[SAD, 2019c] Sadiqi, A., El Abbassi, I., El Barkany, A., Darcherif, M., & El Biyaali, A., "Optimizing Electricity costs during integrated scheduling of jobs and stochastic preventive maintenance under time-of-use electricity tariffs", Management and Production Engineering Review,10(4), pp. 123–132, 2019.

[SAD, 2020a] Sadiqi, A., El Abbassi, I., El Barkany, A., Darcherif, M., & El Biyaali, A., "Green Scheduling of Jobs and flexible Periods of Maintenance in a Two-Machine Flowshop to minimize Makespan, a measure of Service Level and Total Energy Consumption", Advances in Operations Research, pp. 9, 2020.

[SAD, 2020b] Sadiqi, A., El Abbassi, I., El Barkany, A., Darcherif, M., & El Biyaali, A., "Speed scaling technique integrated in scheduling of production and maintenance under energy constraints using genetic algorithms", E3S Web Conf. 170 01029, 2020.

[SAD, 2020c] Sadiqi, A., El Abbassi, I., El Barkany, A., Moumen, D., & El Biyaali, A., "A genetic algorithm and b&b algorithm for integrated production scheduling, preventive and corrective maintenance to save energy", Management and Production Engineering Review,11(4), pp.138–148, 2020.

[SHA, 2015] Sharma, A., Zhao, F., & Sutherland, J. W., "Econological scheduling of a manufacturing enterprise operating under a time-of-use electricity tariff, Journal of Cleaner Production, 108, pp.256–270, 2015.

[SHO, 2015] Shoaardebili, N., & Fattahi, P., "Multi-Objective Meta Heuristics to Solve Three-Stage Assembly Flow Shop Scheduling Problem with Machine Availability Constraints", Int. J. Prod. Res, 53, pp. 944–968, 2015.

[SMI ,1967] M.L. Smith, R.A. Dudek, "A general algorithm for solution of the n-job, m-machine sequencing problem of the flowshop", Oper Res, 15(1), pp. 71–82, 1967.

[SRI, 1994] Srinivas, N., Deb, K., "Multi-objective optimization using non-dominated sorting ingenetic algorithms", Evolutionary Computation, 2(3), pp. 221–248,1994.

[STA, 2005] Stafford, E.F., F.T. Tseng, a& Gupta, J.N.D., "Comparative Evaluation of MILP Flowshop Models." Journal of the Operational Research Society 56, pp. 88–101, 2005

[SVI, 2004] Sviridenko, M. I., "A note on permutation flow shop problem," Annals of Operations Research, vol. 129, pp. 247–252, 2004.

[SWA, 2007] Swaminathan, R., Pfund, M. E., Fowler, J. W., Mason, S. J., & Keha, A., "Impact of permutation enforcement when minimizing total weighted tardiness in dynamic flowshops with uncertain processing times", Computers & Operations Research, 34(10), pp. 3055–3068, 2007.

[TAY, 2014] Tayeb, F.B.S., & Belkaaloul, W., "Towards an Artificial Immune System for Scheduling Jobs and Preventive Maintenance Operations in Flowshop Problems", In Proceedings of the 2014 IEEE 23rd International Symposium on Industrial Electronics (ISIE), Istanbul, Turkey, pp. 1065–1070, 2014.

[TSE, 2001] Tseng, F. T., & Stafford, E. F., "Two MILP models for the N × M SDST flowshop sequencing problem. International Journal of Production Research, 39(8), pp. 1777–1809, 2001.

[TSE, 2004] Tseng, F. T., Stafford, E. F., & Gupta, J. N., "An empirical analysis of integer programming formulations for the permutation flowshop", Omega, 32(4), pp. 285–293, 2004.

[USE, 2016] U.S. Energy Information Administration. International Energy Outlook; U.S. Energy Information Administration: Washington, DC, USA, 2016. Available online: http://www.eia.gov/forecasts/ieo/pdf/0484(2016).pdf.

[WAG, 1959] Wagner, H.M., "An Integer Linear-Programming Model for Machine Scheduling." Nay Researcher Log Quarterly, 6(2), pp.131–140, 1959..

[WAN, 2013] Wang, Y., & Li, L. (2013). Time-of-use based electricity demand response for sustainable manufacturing systems. Energy, Vol. 63, pp. 233-244.

[WAN, 2017] Wang, Y., & Li, L., "Manufacturing profit maximization under time-varying electricity and labor pricing", Comput. Ind. Eng, 104, pp. 23–34, 2017.

[WAN, 2019] Wang, J.J., & Wang, L., "Decoding methods for the flow shop scheduling with peak power consumption constraints", Int. J. Prod. Res, 57, pp. 3200–3218, 2019.

[WAN, 2019] Wang, J.J., &Wang, L., "Decoding methods for the flow shop scheduling with peak power consumption constraints", Int. J. Prod. Res, 57, pp. 3200–3218, 2019.

[WEI, 1999] Weinstein, L., & Chung, C. H., "Integrating maintenance and production decisions in a hierarchical production planning environment", Computers & Operations Research, 26, pp. 1059–1074, 1999.

[WEI, 2016] Wei- W. C., Zhiqiang, L., Binghai, Z., Chen, L & Xiaole, H., "A hybrid genetic algorithm for non-permutation flow shop scheduling problems with unavailability constraints", International Journal of Computer Integrated Manufacturing, 29(9), pp. 944–961, 2016.

[WUS, 2018] Wu, X., Sun, Y., 2018., "A green scheduling algorithm for flexible job shop with energy-saving measures", J. Clean. Prod. 172, pp. 3249-3264, 2018.

[WUX, 2018] Wu, X., & Sun, Y., A green scheduling algorithm for flexible job shop with energy-saving measures. J. Clean. Prod, 172, pp. 3249–3264, 2018.

[WUX, 2019] Wu, X., &Che, A., "Energy-efficient no-wait permutation flow shop scheduling by adaptive multi-objective variable neighborhood search", Omega, 94, pp. 102117, 2019.

[XIN, 2018] Xing, Y., Yusuf, O., Zechun, H., & Yonghua, S., "A review on price-driven residential demand response", Renewable and Sustainable Energy Reviews. Vol. 96, pp. 411–419, 2018.

[XUE, 2018] Xueqi, W & Ada, C., "A memetic differential evolution algorithm for energy efficient parallel machine scheduling", Omega, 82, pp. 155–165, 2018.

[YAN, 2011] Yang, S., Ma, Y., Xu, D., & Yang, J., "Minimizing total completion time on a single machine with a flexible maintenance activity", Computers & Operations Research, 38(4), pp. 755–770, 2011.

[YAN, 2016] Yan, J., Li, L., Zhao, F., Zhang, F., & Zhao, Q., "A multi-level optimization approach for energy-efficient flexible flow shop scheduling", J. Clean. Prod, 137, pp.1543–1552, 2016.

[YAO,1995] Yao, F., Demers, A., & Shenker, S., "A scheduling model for reduced CPU energy", Proceedings of IEEE Symposium on Foundations of Computer Science (FOCS), pp. 374-382, 1995.

[YIN, 2017] Yin, Y., Wang, Y., Cheng, T., Liu, W., & Li, J., "Parallel-machine scheduling of deteriorating jobs with potential machine disruptions", Omega, 69,pp.17_28, 2017.

[YON, 2013] Yong, W., & Lin, L., "Time-of-use based electricity demand response for sustainable manufacturing systems", Energy, Vol. 63, pp. 233-244, 2013.

[ZEY, 2014] Zeyi, S., & Lin, L., "Potential capability estimation for real time electricity demand response of sustainable manufacturing systems using Markov Decision Process", Journal of Cleaner Production.Vol. 65, pp. 184-193, 2014.

[ZHA, 2013] Zhang, H., Zhao, F., & Sutherland, J. W., "Manufacturing Scheduling for Reduced Energy Cost in a Smart Grid Scenario", Re-Engineering Manufacturing for Sustainability, pp.183–189, 2013.

[ZHA, 2016] Zhang, R., & Chiong, R., “Solving the energy-e_cient job shop scheduling problem: A multi-objective genetic algorithm with enhanced local search for minimizing the total weighted tardiness and total energy consumption”, J. Clean. Prod, 112, pp. 3361–3375, 2016.

[ZHA, 2017] Zhang, H., Deng, Z., Fu, Y., Lv, L., & Yan, C., “A process parameters optimization method of multi-pass dry milling for high efficiency, low energy and low carbon emissions”, J. Clean. Prod. 148, pp. 174-184, 2017.

[ZHI, 2015] Zhiqiang, L., Weiwei, C., & Xiaole, Han., "Integrated production and preventive maintenance scheduling for a single machine with failure uncertainty", Computers & Industrial Engineering, 80, pp. 236-244, 2015.

Annexes

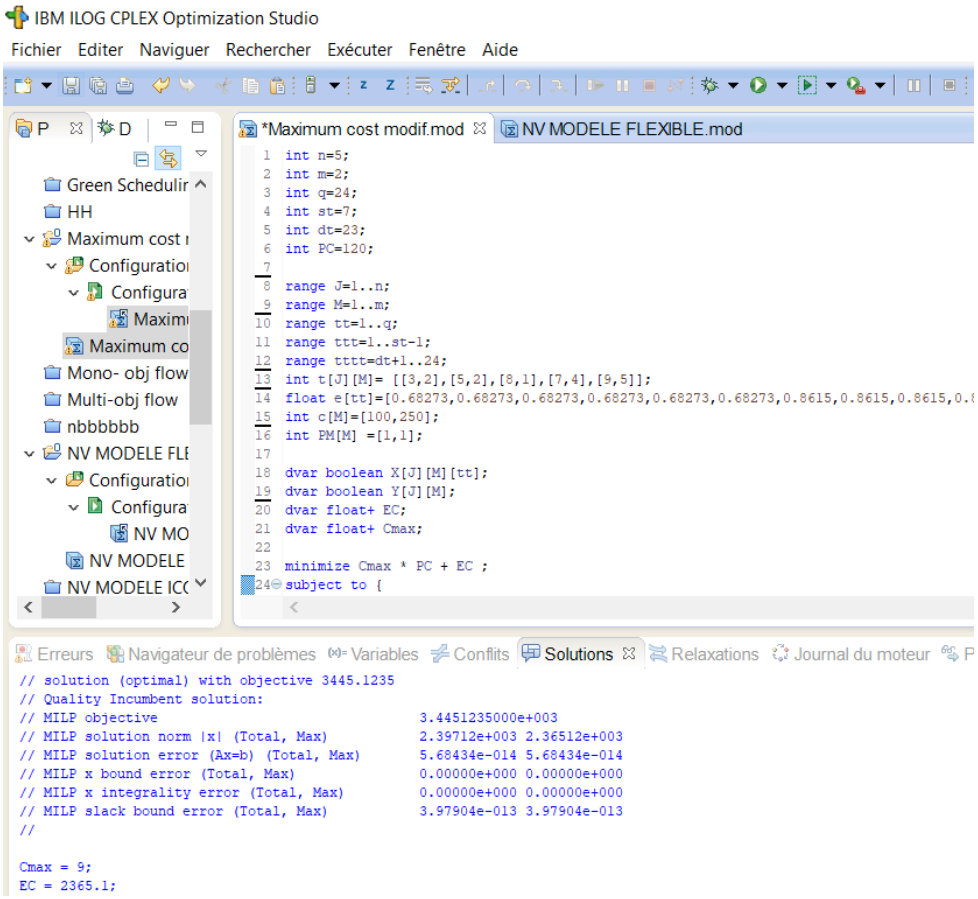

Figure A1.1 : Résultat optimale du scénario n° 1(5 tâches et de 2 machines)

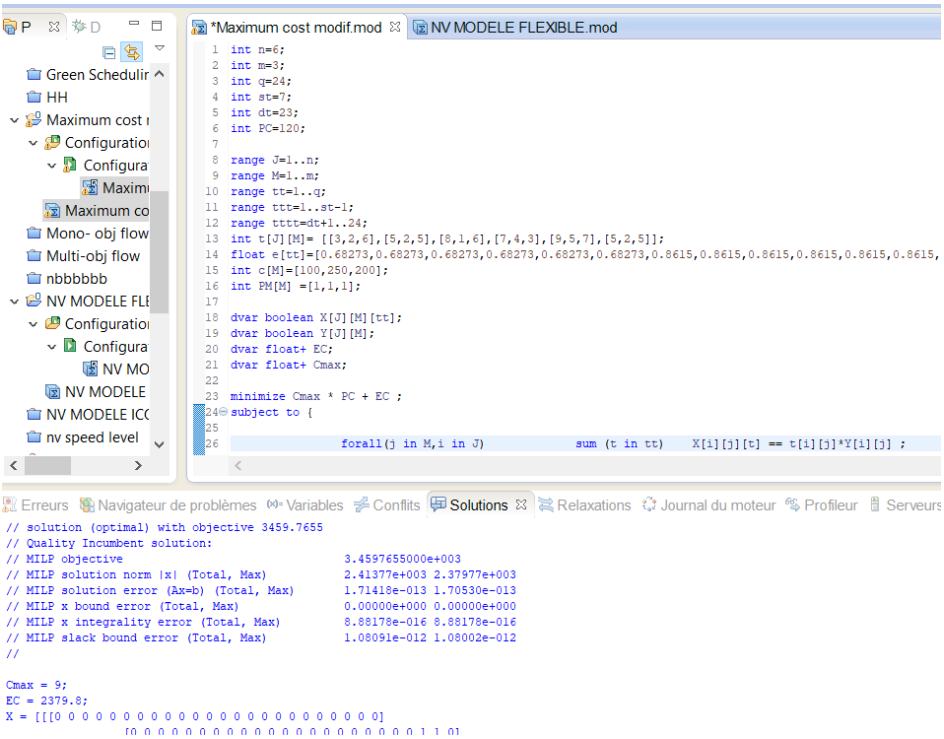

Figure A1.2 : Résultat optimale du scénario n° 2 (6 tâches et de 3 machines)