



HAL
open science

Transition vers une usine 4.0 grâce à l'utilisation d'outils d'aide à la décision dans le secteur textile

Alice Berthier

► To cite this version:

Alice Berthier. Transition vers une usine 4.0 grâce à l'utilisation d'outils d'aide à la décision dans le secteur textile. Gestion et management. Université de Technologie de Troyes, 2021. Français. NNT : 2021TROY0040 . tel-03810718

HAL Id: tel-03810718

<https://theses.hal.science/tel-03810718>

Submitted on 11 Oct 2022

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

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

Thèse
de doctorat
de l'UTT

Alice BERTHIER

Transition vers une usine 4.0 grâce à l'utilisation d'outils d'aide à la décision dans le secteur textile

Champ disciplinaire :
Sciences pour l'Ingénieur

2021TROY0040

Année 2021

THESE
pour l'obtention du grade de
DOCTEUR
de l'UNIVERSITE DE TECHNOLOGIE DE TROYES
en SCIENCES POUR L'INGENIEUR

Spécialité : OPTIMISATION ET SURETE DES SYSTEMES

présentée et soutenue par

Alice BERTHIER

le 30 novembre 2021

**Transition vers une usine 4.0 grâce à l'utilisation d'outils d'aide
à la décision dans le secteur textile**

JURY

M. Lionel AMODEO	PROFESSEUR DES UNIVERSITES	Président
M. Stéphane DAUZÈRE-PÉRÈS	PROFESSEUR ECOLE DES MINES ST-ETIENNE - HDR	Rapporteur
M. El-Ghazali TALBI	PROFESSEUR DES UNIVERSITES	Rapporteur
Mme Gülgün ALPAN-GAUJAL	PROFESSEURE DES UNIVERSITES	Examinatrice
Mme Sophie ESCARIO	DIRECTRICE PROJETS STRATEGIQUES	Examinatrice
M. Hicham CHEHADE	DOCTEUR	Directeur de thèse
Mme Alice YALAOUI	MAITRE DE CONFERENCES - HDR	Directrice de thèse

Personnalités invitées

M. Christian BOUILLOT	RESPONSABLE PROJETS STRATEGIQUES - PETIT BATEAU
M. Jean-Marc GUILLEMET	DIRECTEUR DES OPERATION - PETIT BATEAU
M. Farouk YALAOUI	PROFESSEUR DES UNIVERSITES

Remerciements

Je tiens à commencer par remercier mes directeurs de thèse : Dr. Alice Yalaoui et Dr. Hicham Chehade, pour leur accompagnement, leur patience et leur pédagogie tout au long de ces années. Ils ont su me guider et me rassurer pour mener à bien mes travaux de recherches. Je remercie également Pr. Farouk Yalaoui et Pr. Lionel Amodeo pour leur implication dans le projet et leur disponibilité toujours bienveillante.

J'adresse toute ma gratitude aux membres du jury qui me font l'honneur de participer à l'examen et l'évaluation de cette thèse : Monsieur Stéphane Dauzère-Pérès, professeur à l'école des Mines de Saint-Etienne et Monsieur El-ghazali Talbi, professeur des universités à l'université de Lille en leur qualité de rapporteurs. Madame Gülgün Alpan, professeur des universités à l'Institut Polytechnique de Grenoble en sa qualité d'examineur.

Je remercie également très sincèrement Christian Bouillot qui a encadré ce projet au sein de Petit Bateau et m'a permis de le mener à bien. Je remercie également Franck Caron pour le partage de son métier qu'il a eu avec moi, sa patience, sa bienveillance et l'implication qu'il a mise dans chaque étape du projet. Mes remerciements vont aussi vers Christophe Thevenet sans qui le projet n'aurait pas connu l'aboutissement actuel. Merci également à Jean-Luc Barnet, Sophie Escario et Jean-Marc Guillemet pour la confiance qu'ils m'ont portée face à ce projet pionnier pour Petit Bateau en terme de collaboration avec un institut de recherche et enfin à Guillaume Coquelet de l'avoir initié.

Je remercie toute l'équipe d'Opta LP qui a permis de rendre concret le travail sur le projet d'ordonnancement au travers d'un logiciel. Le projet a été une réussite et je suis reconnaissante de l'expérience qu'ils m'ont apportée avec patience : Yoni, Nicolas, Han, Alexandre et Rezvan.

Je remercie mes collègues de l'UTT sur qui j'ai pu m'appuyer tant d'un point de vu scientifique que moral pour aller au bout de ce travail et plus particulièrement Cyril, Sofia, Quy, Mariam et Paulin.

De manière similaire, je remercie mes collègues de Petit Bateau pour le partage que nous avons eu et le soutien qu'ils ont pu m'offrir et particulièrement Clara, Christelle, Mathilde, Isabelle et Anne-Cassandra. J'ai reçu un très bel accueil qui a grandement facilité mon intégration.

Je remercie infiniment ma famille toujours présente pour m'encourager dans mes projets et les soutenir jusqu'à la ligne d'arrivée. Ma mère et mon père, Agnès et Jean-Christophe, ainsi que Louis, Antoine et Marie. Je remercie également de tout mon coeur Julien pour sa présence constante pour me soutenir, m'encourager et me supporter même dans les moments plus difficiles.

Pour finir, je remercie toutes les personnes qui de près ou de loin ont permis la réussite de ce projet. Il a été l'occasion pour moi de vivre une très belle expérience, de rencontrer des personnes passionnées et d'apprendre dans de nombreux domaines.

Les travaux présentés dans cette thèse ont été effectués dans le cadre d'une convention CIFRE entre l'Université de Technologie de Troyes (UTT) et l'entreprise Petit Bateau à Troyes. Je remercie l'Association Nationale de la Recherche et de la Technologie (ANRT) pour avoir contribué au financement de cette thèse.

Résumé

Les travaux présentés dans cette thèse ont été motivés par les besoins de l'entreprise textile Petit Bateau. L'entreprise s'ouvre aux enjeux de l'industrie 4.0. Engager cette thèse fut un moyen de s'y inscrire, en étudiant la mise en place de nouveaux outils d'aide à la décision. Le contexte de l'entreprise offre une grande variété de sujets originaux et stimulants dans le domaine de la recherche opérationnelle. Le premier problème traité est celui d'une allocation dynamique des produits sur la chaîne logistique. Plusieurs sites peuvent être éligibles pour fabriquer chaque produit. Un modèle a été proposé pour optimiser l'affectation en minimisant les coûts (stockage, production et transports). Le second est un problème d'agencement dynamique de l'atelier de tricotage. L'optimisation du positionnement des machines dans l'atelier en fonction de leur utilisation est apparue comme un pré requis avant de proposer une résolution au problème d'ordonnancement de ce même atelier. L'atelier est composé de machines parallèles non reliées avec plusieurs contraintes spécifiques. Pour aller plus loin et s'adapter aux imprévus courants dans un atelier de production, le réordonnancement a également été étudié. La mise en place dans l'entreprise de chacune des solutions étudiées est abordée dans la thèse. Les limites terrain qui ne l'ont éventuellement pas permise sont expliquées mais également les succès obtenus, notamment la production d'un logiciel d'ordonnancement à présent utilisé par le responsable de l'atelier.

Abstract

This thesis presents works motivated by the evolution objective of the textile company Petit Bateau. The company starts to see the importance of the stakes of the Industry 4.0. Begin this thesis was a step to go in this direction with the development of decision tools. The company context offers a large variety of original and challenging studies in operational research. The first problem is a dynamic products allocation problem on the logistic supply chain. Several sites can be selected to process different products. A mathematical model is proposed to optimize the allocation by minimizing the total cost (inventory, production and transport costs). The second one is a dynamic layout problem of the knitting workshop. The layout optimization relative to the utilization rate of each machine seems to be a prerequisite before the resolution of the scheduling problem of this identic workshop. The workshop is composed of unrelated parallel machines with several specific constraints. To go further, the rescheduling problem is studied to take into consideration disturbances that can occur during production. The feasibility in the company of each solution studied is presented. The constraints on field that not allowed it are explained but also the success obtained. Such as the production of a scheduling software nowadays used by the workshop manager.

Table des matières

Table des figures ix

Liste des tableaux xiii

Introduction Générale	1
------------------------------	----------

Chapitre 1
Usine 4.0 et Contexte Industriel

1.1	Industrie 4.0	4
1.1.1	Une nouvelle révolution industrielle	4
1.1.2	La nouvelle génération de la supply chain	5
1.2	L'industrie textile française	7
1.2.1	L'histoire industrielle du secteur textile	7
1.2.2	Les outils d'aide à la décision	9
1.3	Petit Bateau	14
1.3.1	Groupe Rocher	14
1.3.2	L'entreprise	17
1.3.3	Valeurs de l'entreprise	18
1.3.4	Cibles et univers produits	20
1.3.5	Cycle de vie du produit	21
1.3.6	Sites Petit Bateau	23
1.4	Conclusion	35

Chapitre 2

Problème d'allocation dynamique de produit

2.1	Description du problème	38
2.2	État de l'art	41
2.3	Méthode de résolution	43
2.3.1	Notations	44
2.3.2	Variables de décision	45
2.3.3	Fonction objectif	45
2.3.4	Contraintes	45
2.4	Campagnes de tests numériques	46
2.4.1	Tests théoriques	46
2.4.2	Tests sur des instances Petit Bateau	48
2.4.3	Mise en application réelle	49
2.5	Conclusion	51

Chapitre 3

Problème d'agencement

3.1	Contexte	54
3.2	Description du problème	55
3.3	État de l'art	57
3.3.1	Facility layout problem	59
3.3.2	Group Technology Problem	59
3.3.3	Assembly Line Balancing Problem	61
3.3.4	Worker Assignment Problem	63
3.4	Modèle mathématique	64
3.4.1	Notations	64
3.4.2	Modèle agrégé	64
3.4.3	Modèle séquentiel	66
3.5	Algorithme génétique	68
3.5.1	Principe général	68
3.5.2	Représentation de la solution	69

3.5.3	Décodage	71
3.5.4	Initialisation de la population	71
3.5.5	Sélection, opérateurs de croisement et de mutation, procédure de correction	71
3.5.6	Procédure de génération	73
3.6	Campagnes de tests numériques	73
3.6.1	Tests théoriques	73
3.6.2	Tests sur des instances Petit Bateau	76
3.6.3	Mise en application	78
3.7	Conclusion	78

Chapitre 4

Optimisation de l'ordonnancement

4.1	Description du problème	82
4.2	État de l'art	83
4.2.1	L'ordonnancement	83
4.2.2	L'ordonnancement de machines parallèles	85
4.3	Modèle mathématique	92
4.3.1	Notations	93
4.3.2	Données	94
4.3.3	Variables de décision	94
4.3.4	Fonction objectif	95
4.3.5	Contraintes	95
4.4	Algorithme génétique	98
4.4.1	Représentation de la solution, décodage, initialisation de la population et opérateur de sélection	99
4.4.2	Opérateurs de croisement et de mutation	102
4.4.3	Procédure de génération suivante	106
4.5	Campagne de tests numériques - cas théoriques	107
4.5.1	Générateur d'instances de petite taille	107
4.5.2	Paramétrage de l'algorithme	107
4.5.3	Comparaison du modèle mathématique et du GA	111

4.6	Campagne de tests numériques - cas réels	112
4.6.1	Présentation du système réel	113
4.6.2	Résultats des instances réelles	116
4.7	Conclusion	118

Chapitre 5 Problème de réordonnancement

5.1	Description du problème	122
5.2	État de l'art	123
5.3	Méthode de résolution	125
5.3.1	Générateur d'instances	129
5.3.2	Fonctions objectifs	129
5.4	Campagne de tests numériques	131
5.5	Conclusion	136

Chapitre 6 Mise en application

6.1	Description du projet	138
6.1.1	Planning projet	139
6.1.2	Équipe projet	140
6.1.3	Cahier des charges	142
6.2	Logiciel d'ordonnancement	143
6.2.1	Données existantes	143
6.2.2	Création de données	144
6.2.3	Élaboration du logiciel	145
6.3	Conclusion	151

Chapitre 7 Conclusions et perspectives

Bibliographie

Table des figures

1.1	Résumé des apports technologiques de chacune des quatre révolutions industrielles	4
1.2	Schéma d'évolution de la production à travers les différentes révolutions industrielles (Koren (2010))	5
1.3	Schéma de la supply chain "restreinte" (Asadollahi-Yazdi <i>et al.</i> (2020))	6
1.4	Schéma de la supply chain "étendue" (Asadollahi-Yazdi <i>et al.</i> (2020))	6
1.5	Évolution du secteur textile en France depuis 1990 : effectifs, production et commerce extérieur (Goin <i>et al.</i> (2018))	8
1.6	Nombre de publications dans le domaine du textile depuis 1980 (Yalaoui et Ouazene (2020))	9
1.7	Nombre de publications dans le domaine du textile par pays (Yalaoui et Ouazene (2020))	10
1.8	Chiffres du Groupe Rocher 2019 - Rapport annuel	15
1.9	Chiffres du Groupe Rocher 2019 - Rapport annuel	16
1.10	Raison d'être du Groupe Rocher	16
1.11	Étapes de fabrication d'un vêtement Petit Bateau	17
1.12	La petit culotte, une innovation Petit Bateau en 1918	18
1.13	L'usine St Joseph de Troyes	19
1.14	Petit Bateau en chiffres	19
1.15	Groupe Rocher, une entreprise à mission	20
1.16	Logo Petit Bateau de la nouvelle plateforme de marque	20
1.17	Les 12 étapes du process de fabrication d'un produit Petit Bateau .	22
1.18	Plan de l'usine Petit Bateau de Troyes	25
1.19	Différentes formes de fil	26
1.20	Cartographie de la provenance des fils	26
1.21	Les 5 étapes de formation d'une maille	27
1.22	Guide de l'aiguille via une platine	28
1.23	Différentes familles de maille réalisées à Troyes	28
1.24	Schéma d'un métier à tricoter	29
1.25	Étapes de finition teinture	29
1.26	Machines ouvreuse et exprimeuse	30

Table des figures

1.27	Machines séchoir	31
1.28	Machines rame	32
1.29	Machines calandre	33
2.1	Représentation de la répartition de la chaîne logistique du cas industriel de Petit Bateau	38
2.2	Photos de tissus correspondant aux quatre familles	40
2.3	La fonction objectif la plus étudiée est la fonction coût (Di Pasquale <i>et al.</i> (2020))	42
2.4	Représentation de la chaîne logistique sous forme d'un graphe	44
2.5	Proportions initiales des produits entre les différents sites de la chaîne logistique	49
2.6	Proportions finales des produits entre les différents sites de la chaîne logistique	49
3.1	Les bobines de fils sont rangées dans des armoires transparentes	54
3.2	Les machines rotatives tricotent grâce à leurs quelques 3 000 aiguilles	55
3.3	Agencement initial des machines réparties en 4 groupes	56
3.4	Quadrillage de l'atelier de tricotage	58
3.5	Classification des problèmes FLP Drira <i>et al.</i> (2007)	60
3.6	Schéma d'itérations des étapes de l'algorithme génétique	69
3.7	Agencement à partir du modèle agrégé	74
3.8	Agencement à partir du modèle séquentiel	74
3.9	Agencement initial des machines dans l'atelier avec représentation de leur taux d'utilisation	77
3.10	Agencement après utilisation de l'AG pour créer et agencer 4 groupes de machines	77
3.11	Agencement après utilisation de l'AG pour créer et agencer 5 groupes de machines	77
4.1	Exemple de découpage d'un OF de 456 kg en quatre lots de 114 kg	83
4.2	Répartition des publications sur les problèmes d'ordonnancement de machines parallèles depuis 1997	86
4.3	Répartition des problèmes de machines parallèles	87
4.4	Répartition des objectifs étudiés	89
4.5	Répartition des méthodes approchées utilisées	90
4.6	Répartition des caractéristiques prises en compte dans les publications	91
4.7	Répartition des types de temps de changement	92
4.8	Construction du modèles mathématique qui correspond au problème Petit Bateau	94
4.9	Fonctionnement des variables bianires α et β (Nguyen (2017))	97

4.10	Représentation d'un chromosome sous forme d'une séquence par machine	100
4.11	Représentation d'un chromosome utilisée	100
4.12	Exemple de la représentation d'une solution dans un chromosome .	101
4.13	Décodage de la séquence solution de l'exemple	102
4.14	Exemple de croisement en un point	104
4.15	Exemple de croisement en deux points	104
4.16	Exemple de croisement de l'affectation des machines	104
4.17	Exemple de croisement par sélection aléatoire	104
4.18	Exemple de croisement par regroupement de la meilleure zone . . .	105
4.19	Exemple de croisement par conservation de la meilleure zone	105
4.20	Exemple de mutation de la moins bonne machine	106
4.21	Exemple de mutation par groupement des sous-lot d'une tâche . . .	106
4.22	Methode Taguchi - résultats des paramètres	108
4.23	Méthode Taguchi - analyse de l'impact des différents opérateurs de croisement	110
4.24	Méthode de Taguchi - analyse de l'impact des différents opérateurs de mutation	110
4.25	Exemple d'une affiche reproduite en tricotage	114
4.26	Plan d'implantation des machines dans l'atelier de tricotage	116
4.27	Comparaison du c_{max} réel et c_{max} de l'AG sur les 11 instances . . .	118
4.28	Comparaison du c_{max} réel et du c_{max} de l'AG en fonction de la quantité de production	119
4.29	Comparaison du c_{max} réel et du c_{max} de l'AG en fontion du nombre de tâhces	119
5.1	Flowchart de la méthode de résolution du réordonnancement	125
5.2	Ordonnancement initial de l'exemple	127
5.3	Réordonnancement de l'exemple après une indisponibilité machine avec l'indicateur de stabilité égal à 0 et celui des dates de fin à 60 .	127
5.4	Réordonnancement de l'exemple après une indisponibilité machine avec l'indicateur de stabilité égal à 2 et celui des dates de fin à 43 .	128
5.5	Réordonnancement de l'exemple après l'arrivée d'une nouvelle tâche. L'indicateur de stabilité égale 0 et celui des dates de fin égale 0 . .	128
5.6	Réordonnancement de l'exemple après l'arrivée d'une nouvelle tâche. L'indicateur de stabilité égale 0 et celui des dates de fin égale 5 . .	128
5.7	Performance et stabilité en fonction du pourcentage de tâches à réordonnancer	132
5.8	Performance et stabilité en fonction de la date de perturbation . . .	132
5.9	Répartition des valeurs de performance pour chaque type de perturbation en minimisant uniquement c_{max}	133

5.10 Répartition des valeurs de stabilité pour chaque type de perturbation en minimisant uniquement c_{max}	133
6.1 Feuille d'ordonnancement réalisée manuellement	139
6.2 Macro planning du projet de développement du logiciel d'ordonnancement	140
6.3 Planning détaillé du projet de développement du logiciel d'ordonnancement	141
6.4 Planning détaillé réalisé du projet de développement du logiciel d'ordonnancement	141
6.5 Représentation du fonctionnement général du logiciel d'ordonnancement	142
6.6 Flux d'échange de données entre Petit Bateau et le logiciel	144
6.7 Décomposition des temps de changement dans l'atelier de tricotage	145
6.8 Écran de visualisation des ordres de fabrication	147
6.9 Écran de visualisation des métiers de l'atelier	147
6.10 Écran de visualisation des caractéristiques supports	148
6.11 Écran de gestion des calendriers des ressources disponibles	148
6.12 Écran de gestion des temps de changement et leurs paramétrages .	149
6.13 Écran de lancement de l'algorithme d'ordonnancement	149
6.14 Écran de visualisation du planning proposé par l'algorithme d'ordonnancement	150

Liste des tableaux

1.1	Industrie 4.0 et industrie du textile Yalaoui et Ouazene (2020) . . .	12
1.2	Nombre de produits par collection	34
2.1	Répartition des produits finis par site d'assemblage pour chaque famille de produit	41
2.2	Répartition des secteurs étudiés (Di Pasquale et al. (2020))	43
2.3	Résolution des instances de la littérature Panicker et al. (2013) . . .	47
2.4	Différence de flux de transport entre les étapes de teinture et d'assemblage entre la chaîne logistique initiale et celle proposée par le modèle MILP par familles de produits	50
3.1	Positionnement du problème d'agencement	58
3.2	Quatre version des SALPB Scholl et Becker (2006)	62
3.3	Représentation du chromosome utilisé dans le GA	71
3.4	Caractéristiques des instances de petite taille	75
3.5	Résultats du modèle agrégé sur les instances de petite taille	75
3.6	Résultats du modèle séquentiel sur les instances de petite taille . . .	75
3.7	Résultats AG données de production 2018 à 2021	78
4.1	Exemple de temps de production p_{mi} par tâche i dans un système non relié pour chaque machine m	82
4.2	Positionnement du problème	93
4.3	Temps d'exécution des tâches de l'exemple	101
4.4	Temps de changement de l'exemple	101
4.5	Paramètres de l'algorithme génétique	108
4.6	Comparaison des résultats entre Cplex-ILOG et l'AG	112
4.7	Caractéristiques des données réelles	115
4.8	Résultats obtenus sur les instances réelles	117
5.1	Temps de production p_{mi}	126
5.2	Temps de changement s_{mij}	127
5.3	Générateur aléatoire d'instances	130

5.4	Résultats références en optimisant c_{max} pour les différentes perturbations	134
5.5	Résultats de performance et stabilité en appliquant les différentes fonctions objectifs aux différentes perturbations	135
6.1	Sources des données existantes	143

Introduction Générale

Les enjeux industriels d'aujourd'hui sont multiples. Les entreprises doivent répondre à des exigences de plus en plus nombreuses à la fois sur la qualité des services, sur leur responsabilité environnementale et également sociétale. Cela se traduit dans l'industrie par la nécessité d'être toujours plus connectée aux clients, à leurs besoins et à leur mode de consommation. Les usines doivent se réinventer pour y répondre en gagnant en agilité et en réactivité. Pour cela, les processus de production sont totalement remis en question. Ce sont les signaux d'une nouvelle révolution industrielle. Après la mécanisation, la production de masse, l'automatisation, l'usine 4.0 utilise les nouvelles technologies et leur connectivité pour adapter les systèmes industriels. La prise de décision dans ce contexte a une importance primordiale. Pour être agile et réactif, il faut être capable de décider de manière rapide et efficace. Il est important d'avoir des données fiables au bon moment. Les entreprises développent de plus en plus d'outils qui leur permettent d'analyser les données toujours plus nombreuses de manière rapide pour les aider à prendre les décisions nécessaires, et cela à tous les niveaux de décision de l'entreprise (stratégique, tactique et opérationnel).

Cette thèse est le fruit d'un partenariat de recherche entre l'Université de Technologie de Troyes et l'entreprise Petit Bateau. Dans ce cadre, des outils d'aide à la décision ont été développés spécifiquement pour répondre au besoin du cas industriel de l'usine Petit Bateau de Troyes. Pour chaque problématique abordée, la même méthodologie a été appliquée. Tout d'abord, le système et le problème ont été clairement définis. Une recherche bibliographique a été effectuée pour trouver des méthodes de résolution déjà appliquées sur des problématiques proches. Une approche par modélisation mathématique a été mise en place puis une approche via le développement de méthaheuristiques pour résoudre les instances réelles de l'entreprise. Les résultats obtenus et la mise en application de chacun des sujets traités sont développés.

Les outils d'aide à la décision qui sont proposés dans cette thèse pour accompagner l'entreprise dans sa transition permettent de prendre des décisions sur les trois niveaux stratégique, tactique et opérationnel : un outil au niveau tactique pour proposer une répartition des produits sur la chaîne logistique de l'entreprise en optimisant les coûts, un second au niveau stratégique pour permettre une réorganisation des machines dans l'atelier de production et enfin, un outil opérationnel pour aider à l'optimisation de l'ordonnancement d'une semaine de production et pour aller plus loin, le réordonnancement suite à l'arrivée d'aléas. Le travail scientifique réalisé sur chacun de ces outils ainsi que les résultats obtenus sont détaillés dans ce manuscrit.

Le premier chapitre est une introduction sur l'industrie 4.0, les outils d'aide à la décision et le contexte industriel dans lequel se place cette thèse. Une description détaillée de l'entreprise, de son fonctionnement et de ses processus de production est faite.

Le chapitre 2 présente un outil d'aide à la décision sur l'affectation des produits sur les différents sites que composent la chaîne logistique. Un modèle mathématique a été établi et les coûts de transport ont pu être significativement réduits.

Le chapitre suivant traite d'un problème d'agencement de machines parallèles dans l'atelier de tricotage. La contribution est la production d'un modèle mathématique en deux versions : agrégé et séquentiel pour répondre à un double objectif de création de groupes de machines de charge équilibrée et de positionnement dans l'atelier suivant les groupes créés. Un algorithme génétique a également été développé pour résoudre les instances réelles de l'entreprise.

Le chapitre 4 résout un problème d'ordonnancement de machines parallèles avec temps de changement et des ressources limitées. Ce problème a dans un premier temps été résolu par la mise en place d'un modèle mathématique pour résoudre des instances de petite taille. Puis un algorithme génétique a été mis en place pour résoudre le cas réel de Petit Bateau. Les résultats obtenus montrent un gain de productivité grâce à l'outil mis en place.

Le chapitre suivant, dans la continuité, traite du problème de réordonnancement. Malgré un ordonnancement performant, des aléas peuvent survenir en cours de production et générer des perturbations sur le planning prévu. La contribution de ce chapitre est l'étude de l'impact de différentes fonctions objectifs sur les décisions qui peuvent être prises.

Pour terminer, le dernier chapitre explique la mise en place du projet de création d'un logiciel d'ordonnancement. Ce projet permet de rendre accessibles et utilisables les résultats qui ont pu être développés au cours de cette thèse par le responsable d'atelier.

Chapitre 1

Usine 4.0 et Contexte Industriel

Sommaire

1.1	Industrie 4.0	4
1.2	L'industrie textile française	7
1.3	Petit Bateau	14
1.4	Conclusion	35

1.1 Industrie 4.0

1.1.1 Une nouvelle révolution industrielle

Entre 2000 et 2019, le classement des marques mondiales avec la plus forte valeur ajoutée a été totalement perturbé par la montée en puissance des grands groupes technologiques tels que Apple, Google, Amazon, Microsoft ou Samsung (Asadollahi-Yazdi *et al.* (2020)). Certains n'étaient même pas dans le classement mondial en 2000. De l'autre côté, des entreprises, pourtant bien cotées dans les années 2000, ont vu leur valeur chuter brusquement. Cela est-il le signe d'une révolution ? Les entreprises qui ont pris les devants sont en général celles qui ont su tirer parti de la révolution 4.0 et proposer des produits innovants et à la pointe de la technologie.

L'industrie 4.0 est une boucle cyclique. Dans les années 1800, l'industrie n'existe pas encore. Il s'agit d'artisanat à partir d'une demande client, demande 100% personnelle. La première révolution vient de la mécanisation grâce à la découverte de nouvelles énergies (Gökalp *et al.* (2017)). Au siècle suivant arrive le modèle Ford avec la standardisation et les lignes de production. La seconde révolution correspond à un changement d'organisation avec des mécanismes d'activité différents. Dans les années 1960 apparaissent les systèmes connectés, la robotique. L'informatique et les nouvelles perspectives d'avenir amènent la troisième révolution car cela n'existait pas avant. Et aujourd'hui, nous revenons sur une hyper personnalisation. Les systèmes sont connectés et communicants. Après 4 révolutions industrielles (figure 1.1), nous sommes revenus sur un schéma de production très varié (personnalisation) avec des volumes moins importants (1.2).

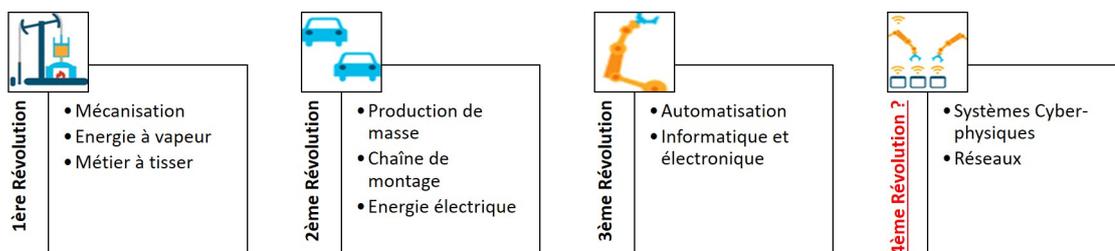


FIGURE 1.1 – Résumé des apports technologiques de chacune des quatre révolutions industrielles

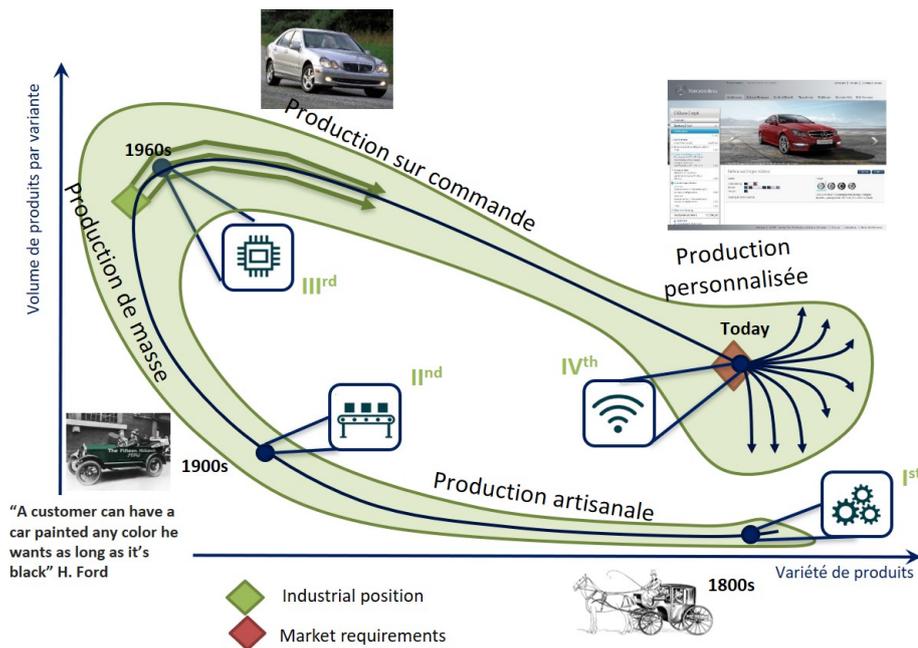


FIGURE 1.2 – Schéma d'évolution de la production à travers les différentes révolutions industrielles (Koren (2010))

Selon la littérature (Produktiviti *et al.* (2018)), l'industrie 4.0 repose sur 9 briques élémentaires : L'internet industriel des objets, l'intégration des systèmes, la fabrication additive, le cloud computing, les robots autonomes, les smart data, la réalité augmentée, la simulation, la cyber sécurité. La mise en place de ces briques élémentaires permette de gagner sur les piliers importants des entreprises : productivité, agilité, innovation, expérience client, coûts, revenus.

1.1.2 La nouvelle génération de la supply chain

La chaîne logistique bascule d'une chaîne dite "restreinte" (figure 1.3) vers une chaîne "étendue" (figure 1.4). La chaîne restreinte est limitée dans son espace et consiste à approvisionner, fabriquer et distribuer. Par la suite, sont apparus de nouveaux indicateurs de performance. Cela permet de ne pas seulement connecter les entités mais aussi les évaluer. Enfin la transition se fait vers la chaîne logistique 4.0, concept qui n'est pas encore totalement défini et commun à tous.

Quel que soit le schéma de la chaîne logistique, il faut analyser les flux et interactions physiques et celles qui ne le sont pas. Les architectures physiques évoluent avec les nouvelles technologies mais le besoin du produit reste constant. En revanche, la chaîne que l'on appelle 4.0 correspond à une gestion de l'information différente avec une couche supplémentaire qu'on est en train d'ajouter qui commu-

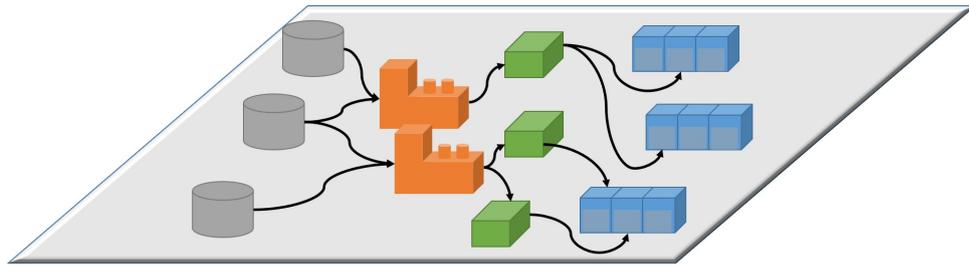


FIGURE 1.3 – Schéma de la supply chain "restreinte" (Asadollahi-Yazdi *et al.* (2020))

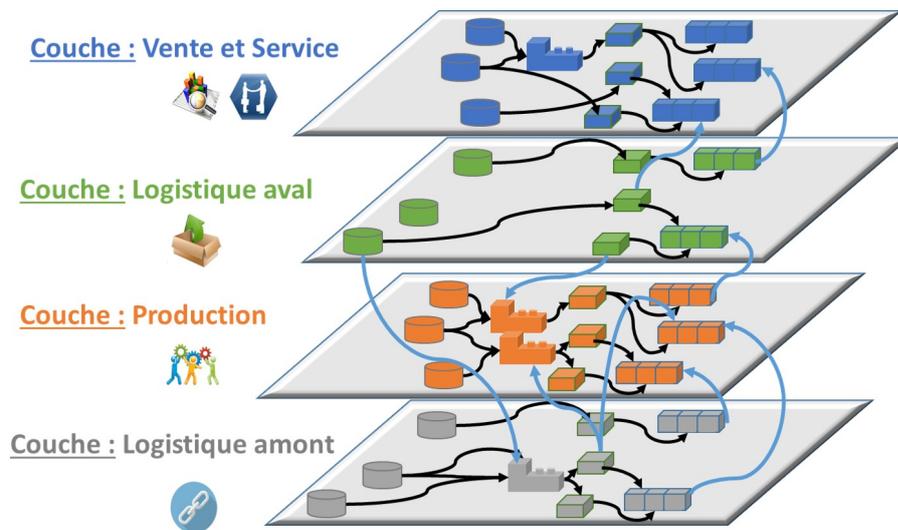


FIGURE 1.4 – Schéma de la supply chain "étendue" (Asadollahi-Yazdi *et al.* (2020))

nique entre le physique et le non physique dans l'objectif global d'amélioration de la performance en allant vers de plus en plus d'anticipation. Le schéma de la chaîne logistique est passé d'une représentation classique linéaire vers une représentation transverse avec des inter-connexions entre chaque maillon de la chaîne positionnée en couche. En effet, la représentation linéaire correspond difficilement à la réalité qui elle n'est jamais linéaire. Cela conduit à remettre en question la gestion de la supply chaîne. La penser comme un système Produit, Processus et Marché donne une interprétation différente (Yalaoui et Ouazene (2020)). Le produit correspond aux besoins d'un type de client et la chaîne de fabrication s'adapte au client et au produit. Il s'agit d'interconnexion entre les couches et d'un réseau de fournisseurs (Markham (2002)).

Les tendances actuelles montrent une augmentation de la diversité des produits, un raccourcissement des cycles de vie, une réduction de la taille des lots, une vo-

latilité de la demande ou encore une complexification des processus de fabrication (Valente *et al.* (2018)). C'est pourquoi les tendances futures transitionnent donc vers une modernisation et une intensification des réseaux couplées avec l'amélioration du flux d'informations et de la disponibilité des données. C'est également la responsabilisation et la sensibilisation (sociale et environnementale) de l'homme, individuellement et collectivement, face à l'effort.

1.2 L'industrie textile française

1.2.1 L'histoire industrielle du secteur textile

La France a connu un âge d'or dans l'industrie textile au milieu du 19^{ème} siècle avec une forte expansion. Cela est dû à l'essor de la machine à coudre après 1829. En parallèle, l'apparition des grands magasins permet d'organiser la distribution. La seconde moitié du 20^{ème} siècle marque la fin de cet âge d'or avec la mondialisation. Celle-ci s'accélère à partir des années 90. La délocalisation massive de la production se met en place avec de graves conséquences sur l'emploi en parallèle de l'augmentation des importations. Entre 1996 et 2015, elle perd 51% de sa production, 40% de sa valeur ajoutée, et 66% de ses effectifs salariés (figure 1.5). Petit Bateau n'échappe pas à cette tendance. L'entreprise au bord de la faillite est rachetée par le groupe Rocher qui crée une usine au Maroc. Actuellement, un nouveau changement s'opère puisque en 2017, pour la première fois depuis 40 ans, une augmentation des effectifs de 3,6% est relevée. La progression des textiles techniques, ainsi qu'une spécialisation vers le haut-de-gammes sont des motifs d'espoir pour l'avenir.

L'industrie textile regroupe deux secteurs : la production textile et l'habillement : les deux savoir-faire de Petit Bateau, tricoteur et confectionneur. La partie textile, en pleine évolution se recentre vers la production de tissus biosourcés, de fibres intelligentes ou de données physiologiques. Une collaboration accrue entre les entreprises, les laboratoires et les écoles d'ingénieurs est essentielle pour permettre la recherche et le développement.

Bien que l'importation reste très forte et la norme (85% des biens consommés sont produits à l'étranger), le retour de la production locale se fait sentir. Ce retour repose sur plusieurs piliers :

- la prise de conscience par les consommateurs de l'importance sociale de leurs achats
- le développement de la mode éthique
- la nécessité de repenser la gestion des stocks

La slow fashion reprend le pas sur la fast fashion (consommation à outrance de produits bas de gamme). Cette prise de conscience est incarnée par des enseignes historiques comme Petit Bateau mais aussi de nouveaux acteurs comme le Slip Français. Grâce à internet, ils ont pu commercialiser sans implantation physique, en jouant sur l'humour, un patriotisme, la fibre écologique ou encore les circuits courts.

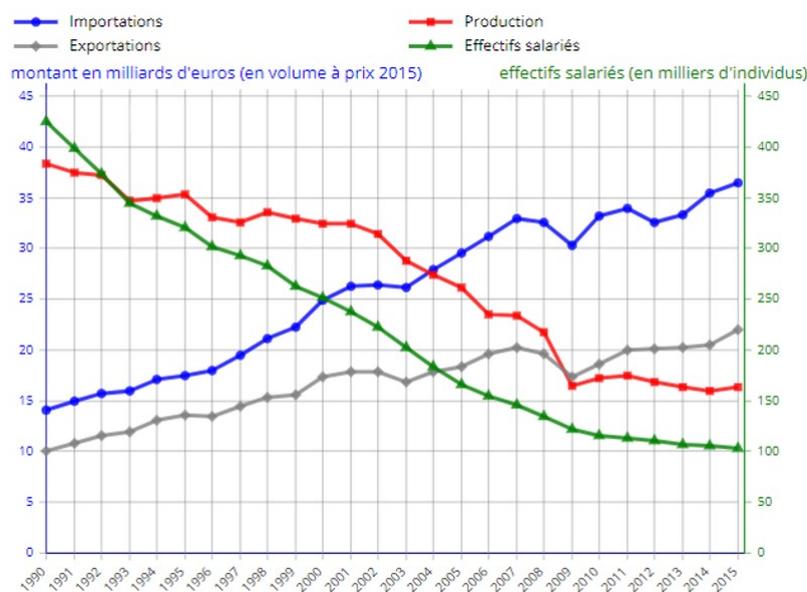


FIGURE 1.5 – Évolution du secteur textile en France depuis 1990 : effectifs, production et commerce extérieur (Goin *et al.* (2018))

Les entreprises textiles ont dernièrement souffert de la crise du COVID. Du fait de ses multiples dépendances, elle n'a pas échappé à la crise à la fois sanitaire et économique. Il faut également prendre conscience de l'incidence des changements de consommation qui se sont opérés sur les consommateurs avec les confinements successifs. Ceux-ci restent plus chez eux, les gens consacrent moins de temps et d'argent à leurs tenues extérieures. La conscience écologique a également poussé vers la consommation accrue de seconde main.

Le positif à retenir de cette crise reste la mobilisation importante de l'ensemble des acteurs de l'industrie textile qui se sont réunis pour palier à la pénurie de masques connue par le pays. Cela a prouvé l'agilité et la capacité du secteur à innover.

1.2.2 Les outils d'aide à la décision

C'est dans ce cadre d'innovation et de digitalisation des outils de travail de Petit Bateau que la thèse a été conduite. Amener de nouveaux outils d'aide à la décision aux collaborateurs va leur permettre de gagner en efficacité sur des tâches à peu de valeur ajoutée. De cette façon, ils vont gagner en efficacité et en motivation sur le reste de leurs tâches.

Il existe de nombreux outils d'aide à la décision pour accompagner les utilisateurs dans leur prise de décisions à tous les niveaux. Ces outils, basés sur un grand nombre de données disponibles, analysent et optimisent les différents scénarii possibles.

Un état de l'art sur le domaine du textile montre qu'il s'agit d'un domaine de plus en plus étudié dans la littérature notamment depuis 2008 (figure 1.6). Et la France se positionne parmi les pays qui publient le plus dans ce domaine (figure 1.7). La Chine et les Etat-Unis sont tout de même les pays les plus actifs dans la publication autour du secteur textile. Ils ont donc une forte influence sur les modèles de cette industrie.

L'industrie textile en France repose sur de nombreux acteurs impliqués dans la recherche. Ce secteur a une vraie valeur économique dans le pays.

Les sujets associés au textile qui reviennent le plus sur internet sont des mots clés tel que l'industrie 4.0, le big data, le textile intelligent, les vêtements intelligents ou encore l'internet des objets. Cela montre que ce sont les réelles problématiques actuelles des entreprises textiles. Il est donc légitime pour Petit Bateau de s'y intéresser et de vouloir progresser autour des ces tendances.

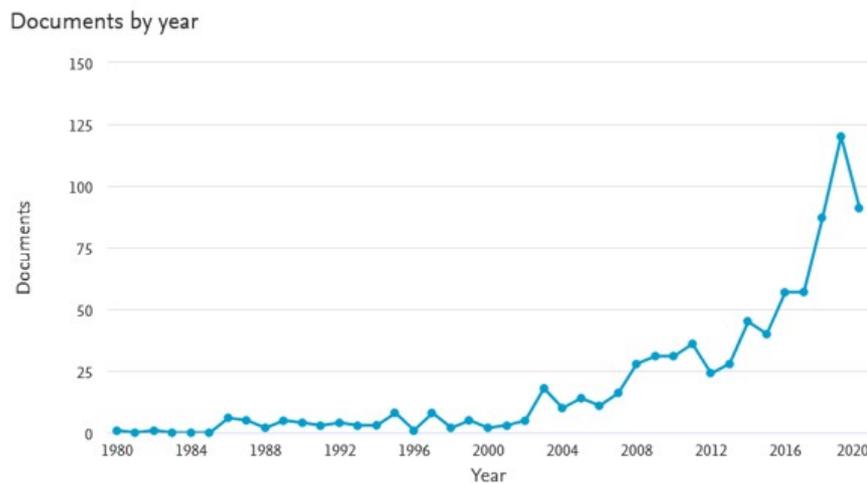


FIGURE 1.6 – Nombre de publications dans le domaine du textile depuis 1980 (Yalaoui et Ouazene (2020))

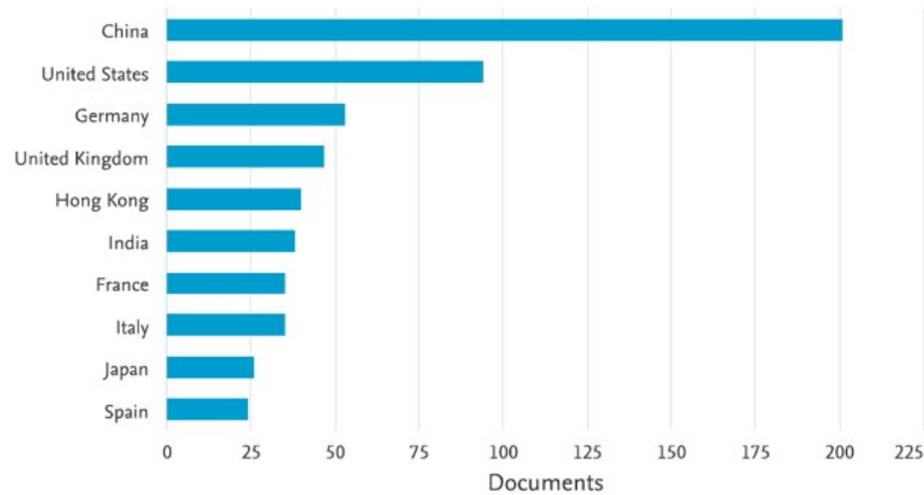


FIGURE 1.7 – Nombre de publications dans le domaine du textile par pays (Yalaoui et Ouazene (2020))

Les auteurs Yalaoui et Ouazene (2020) ont présenté et structuré les enjeux de l'industriel du textile en suivant l'approche PPM (Produit, Procédé et Marché). Dans ce document, ils ont montré comment les outils de l'industrie 4.0 peuvent être une force pour répondre à ces enjeux. Les enjeux présentés constituent un défi pour l'ensemble de la chaîne de valeur de l'entreprise. Des exemples de la littérature sont regroupés et classés selon leur axe de mise en oeuvre : ressources humaines, processus de fabrication et les produits eux-mêmes.

Cinq types de technologies sont cités :

- Intelligence Artificielle : par un système d'apprentissage par rapport à un historique, l'outil est capable d'analyser, classer, identifier de nouvelles entrées
- Internet des objets : grâce à des capteurs ou des systèmes de contrôle en temps réel, le niveau de réactivité peut être augmenté. Une meilleure remontée d'informations est ainsi mise en place
- Robotisation : les tâches avec un niveau de valeur ajoutée peu élevé peuvent être automatisées. Ainsi, performance et compétitivité peuvent être améliorées
- Produits intelligents : cette technologie permet à la fois de suivre le produit et les informations liées au cours de sa conception et production. Un produit intelligent peut également être un produit dans lequel une nouvelle technologie lui est intégrée. Le produit a donc une fonction augmentée par rapport au produit de base

- Fabrication additive : Les tâches à faible valeur ajoutée vont être réduites mais l'entreprise peut également gagner en réactivité grâce à la mise en place de cette nouvelle technologie. Elle peut s'adapter au plus vite aux tendances changeantes du marché

Le tableau 1.1 regroupe et synthétise la revue de littérature sur l'industrie du textile et l'utilisation d'outil d'aide à la décision de l'industrie 4.0 réalisée par [Yalaoui et Ouazene \(2020\)](#).

	Intelligence Artificielle	Internet des objets	Robotisation	Produits intelligents	Fabrication additive
Ressources humaines	Une plus grande précision avec moins d'efforts en utilisant un logiciel de points virtuels Hidayatno et al. (2019)	Réduire le nombre d'opérateurs de surveillance et de contrôle Hidayatno et al. (2019)	Travail réduit pour la confection, la coupe et la couture Hidayatno et al. (2019)	Contrôle indirect des produits Hidayatno et al. (2019)	Automatisation des tâches répétitives à faible valeur ajoutée et forte pénibilité Chang et al. (2016)
Procédés de fabrication	Machines d'auto-diagnostic pour la maintenance préventive, la simulation de tissus et les tests informatisés de fils Hidayatno et al. (2019)	Gestion en temps réel et suivi des stocks et des encours Küsters et al. (2017)	Automatisation du métier de tissage de fils et du contrôle de tension, coupe, couture, etc. Amélioration de la productivité Hidayatno et al. (2019)	Usage de la technologie RFID pour l'identification en temps réel des performances de production et le contrôle des produits Chang et al. (2016)	Personnalisation du produit et des composants (découpe, découpe laser 3D) Hidayatno et al. (2019) et Chang et al. (2016)
Produits	La technologie de tricotage contrôlée par ordinateur réduit les déchets de 80% Chang et al. (2016)	L'internet des objets (industriel) devrait permettre une économie annuelle de 2,6% Koch et al. (2014)	Amélioration de la qualité des produits et réduction des écarts avec la concurrence Chang et al. (2016)	Le marché du textile intelligent en forte expansion à horizon de 2025 Chang et al. (2016)	Composante d'une production sur mesure et permet une réponse plus réactive aux attentes du marché Chang et al. (2016)

TABLEAU 1.1 – Industrie 4.0 et industrie du textile [Yalaoui et Ouazene \(2020\)](#)

Le moteur de ces outils d'aide à la décision repose souvent sur la mise en place de méthodes de résolution dites "approchées". Ces méthodes sont des heuristiques ou méthaheuristiques qui permettent de résoudre des problèmes NP-difficile de grande taille (Talbi (2020)). Ce type de problèmes est souvent rencontré en milieu industriel. C'est pour cela que nous utiliserons l'une de ces méthodes dans ce manuscrit. Comme indiqué dans leur nom, ce sont des méthodes qui ne garantissent pas l'optimalité des résultats obtenus. Cependant, leur efficacité est évaluée par rapport à la capacité à s'en rapprocher. L'avantage de ce type de méthodes par rapport à celles dites de résolution exacte est le temps de calcul nécessaire. En effet, même si la méthode ne garantit pas l'optimalité, elle permet de fortement s'en approcher dans des temps de calculs raisonnables. Les heuristiques sont souvent dédiées à des problèmes spécifiques, les méthaheuristiques au contraire, sont plus génériques dans leur concept général mais nécessitent tout de même des adaptations aux caractéristiques du problème à résoudre. Elles peuvent être appliquées dans de nombreux domaines : l'ordonnancement (Tamssaouet *et al.* (2018)), avec contraintes de ressources (Pellerin *et al.* (2020)) ; en logistique comme pour les problèmes de tournées de véhicule (Liu *et al.* (2020)) ou de stockage (Amodeo *et al.* (2009)) ; ou encore pour résoudre des problèmes de lignes de production (Daoud *et al.* (2014)) et de nombreux autres domaines.

Il existe de nombreuses méthaheuristiques, comme par exemple, les algorithmes génétiques utilisés dans cette thèse. Le principe de fonctionnement sera détaillé des la section 3.5.1. Il repose sur l'imitation de croisements et de mutations sur des gènes. D'autres méthodes existent :

- **Les colonies de fourmis** : (ACO - Ant Colony Optimization) est une méthaheuristique proposée dans les années 1990 par Dorigo et Di Caro (1999). Cette méthode se base sur la reproduction du comportement réel des fourmis. Il s'agit d'un modèle probabiliste qui construit des solutions par rapport au problème étudié à l'aide de certains paramètres. Les probabilités suivent un modèle de phéromone, comme au sein d'une colonie de fourmis, plus le chemin sera intéressant et plus la trace de phéromone sera importante donc la probabilité. L'algorithme est un processus itératif. C'est-à-dire que c'est le comportement de la précédente itération qui va déterminer la nouvelle trace de la phéromone. En plus du paramètre de la phéromone, l'algorithme utilise la désirabilité et l'évaporation pour diversifier et intensifier sa population de solutions.
- **Le recuit simulé** : (SA - Simulated Annealing) est une méthaheuristique qui s'inspire du phénomène physique de recuit utilisé en métallurgie. Cette méthode a commencé à être utilisée dans les années 80 (Kirkpatrick *et al.* (1983)). Cet algorithme utilise un paramètre qui est la température. En fai-

sant fluctuer celle-ci (alternance de cycles de refroidissement lent et de réchauffage), l'algorithme va parcourir un ensemble de solutions pour identifier les extrema d'une fonction. Le point de départ est une valeur de température initiale (valeur élevée) et le point d'arrêt est une valeur basse de température. L'exploration de solutions se fait par voisinage, chaque fois qu'une meilleure solution est trouvée, elle est conservée. En revanche, les solutions moins performantes sont acceptées selon une probabilité liée aux paramètres de température. La stabilité s'obtient au fur et à mesure de l'avancée de l'algorithme et de la baisse progressive de la température du système.

- **La Recherche locale itérative (ILS)** : est une méthode basée sur l'évolution d'une solution pour explorer son voisinage et intensifier une recherche vers un optimum tout en diversifiant pour sortir d'optimum locaux. Pour modifier la solution, elle autorise des mouvements particuliers adaptés en fonction du problème étudié. Une recherche locale s'applique de la façon suivante : sélectionner les solutions à étudier, appliquer la recherche locale à chaque solution et remplacer la solution de base si une meilleure solution a été trouvée. Plusieurs critères d'arrêt peuvent être appliqués comme par exemple le temps d'exécution, le nombre d'itérations maximum ou un nombre d'itérations dont la meilleure solution est identique.

1.3 Petit Bateau

1.3.1 Groupe Rocher

Avant de détailler le fonctionnement de l'entreprise Petit Bateau, le Groupe Rocher auquel elle appartient est présenté dans cette section.

Le groupe Rocher est un groupe familial contrôlé par la famille du fondateur à plus de 98%. Il est dirigé par Bris Rocher depuis 2010. Yves Rocher, Petit Bateau, Stanhome, Dr Pierre Ricaud, Daniel Jouvance, Kiotis, ID Parfums, Flormar, Sabon et Arbonne sont les 10 marques qui composent le Groupe. Fort de ces 10 marques, il se positionne comme un acteur fort des secteurs du bien-être, de la beauté et du textile. Le Groupe a distribué en 2019 près de 700 millions de produits pour un chiffre d'affaires de 2,75 milliards d'euros.

En 2019, 17 696 collaborateurs sont employés au sein du Groupe Rocher. Ces collaborateurs agissent au travers de divers métiers : de la conception jusqu'à la fabrication puis à la distribution des produits. Sa spécificité vient de la diversité des modes de distribution utilisés : ventes par magasin, par internet, directe et par correspondance. Le chiffre d'affaires par mode de distribution, l'effectif par activité, la répartition des effectifs par âge et l'effectif par sexe sont représentés dans les graphiques de la figure 1.8.

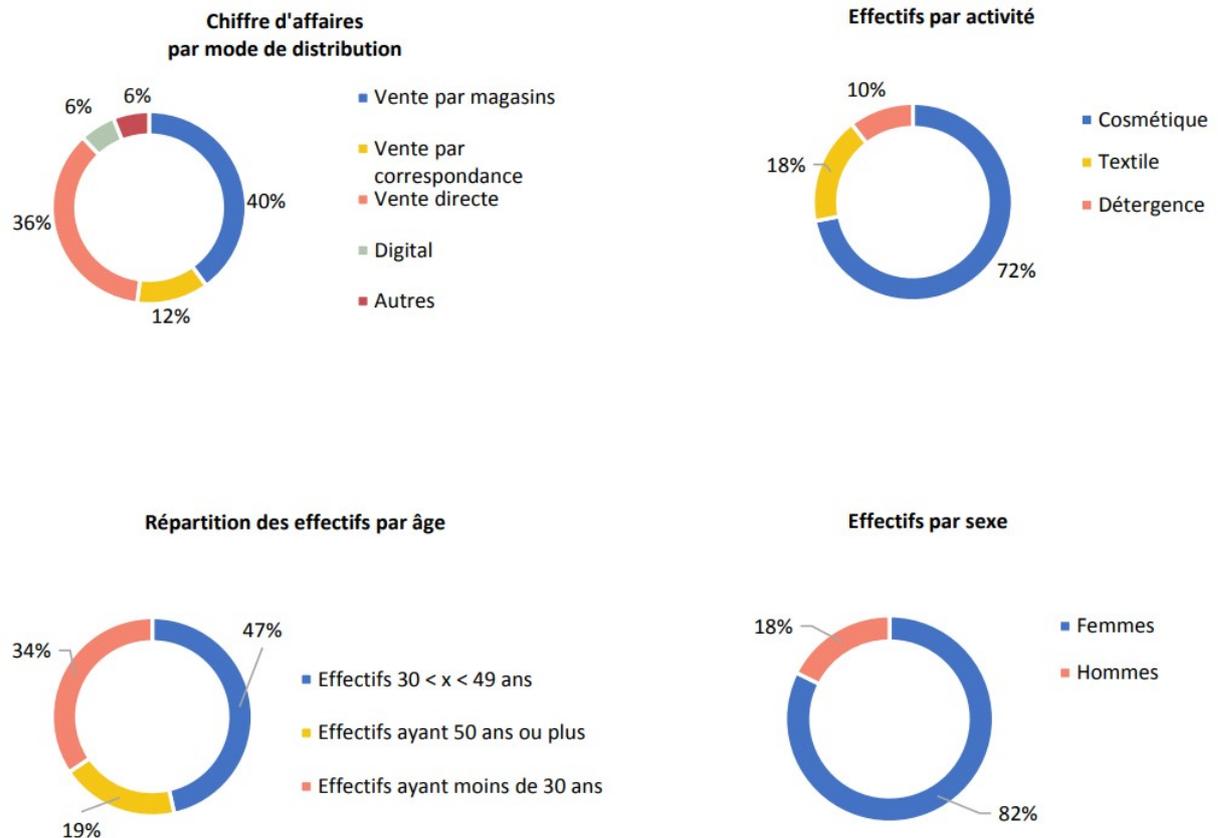


FIGURE 1.8 – Chiffres du Groupe Rocher 2019 - Rapport annuel

Le Groupe d'origine bretonne est résolument tourné vers le monde avec une présence dans 118 pays sur les marchés de la cosmétique, du textile-habillement et de l'embellissement de la maison. La figure 1.9 illustre la répartition des effectifs et du chiffre d'affaires par zone géographique. La présence du Groupe Rocher stimule la vitalité des territoires où il est implanté par ses activités industrielles mais également son implication dans le développement du territoire notamment en France :

- Les activités cosmétique et détergence ont des effectifs stables en Bretagne, soit 2 703 personnes en 2019
- Petit Bateau maintient un effectif de 735 personnes dans l'Aube et confirme ainsi sa place parmi les tous premiers employeurs dans l'industrie textile française.

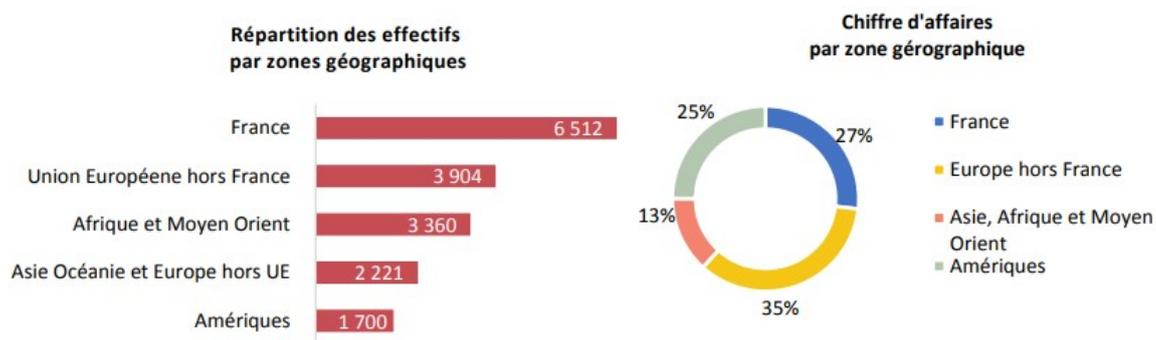


FIGURE 1.9 – Chiffres du Groupe Rocher 2019 - Rapport annuel

Le Groupe Rocher est un groupe intégré. L'ensemble des 10 marques est active sur la totalité de la chaîne de valeur de ses produits : de la recherche à la production via la commercialisation. La majorité des produits est fabriquée dans ses 9 sites de production et distribuée via ses 12 sites logistiques. Après avoir été majoritairement un Groupe de vente par correspondance, le "Retail" est désormais le premier canal de distribution avec près de 1 500 établissements exploités directement par les marques du Groupe Rocher ; près de 1 800 magasins exploités par des partenaires sous les enseignes des marques du Groupe et plus de 5 600 points de ventes multimarques exploités par des agents.

Enfin le Groupe Rocher est devenu en octobre 2019 "Société à Mission", au sens des dispositions de l'article L210-10 du code de commerce. Le Groupe a réécrit ses statuts, notamment sa "Raison d'Être" et les engagements pris ont une valeur juridique (Figure 1.10).

La Raison d'Être de la société, au sens de l'article 1835 du Code Civil, est la suivante :

Convaincue grâce à l'expérience personnelle de Monsieur Yves Rocher, que la nature a un impact positif sur le bien-être des personnes et donc sur leur envie d'agir pour la planète, la société a pour Raison d'Être de reconnecter ses communautés à la nature. Cette Raison d'Être s'incarne dans des expériences, des services et des produits qui procurent du bien-être, grâce aux bienfaits de la nature.

À cette fin, la société revendique un modèle d'entreprise familiale ayant pour ambition de développer un écosystème durable qui combine création de richesses, innovation frugale, et écologisme humaniste.

Forte de ses expertises botaniques, agronomiques et scientifiques et du modèle unique créé à La Gacilly en Bretagne, la société cultive un lien direct avec ses communautés et ses territoires.

FIGURE 1.10 – Raison d'être du Groupe Rocher

1.3.2 L'entreprise

Petit Bateau est une entreprise de fabrication dite intégrée, c'est-à-dire que l'ensemble de la chaîne de production est réalisé en interne. Le tricotage des produits, la teinture et finition ainsi que la confection sont réalisés dans des usines Petit Bateau.

La figure 1.11 illustre les trois étapes de production qui constituent le processus de fabrication de Petit Bateau.

- Tricotage : création des rouleaux de support brut à partir des fils de coton
- Teinture et finition : coloration et finition du support pour donner ses propriétés de couleur et de résistance au tricot
- Assemblage : découpage des différentes pièces dans le tricot et assemblage par couture pour former le vêtement final



FIGURE 1.11 – Étapes de fabrication d'un vêtement Petit Bateau

L'entreprise est innovante depuis sa création. Jean Valton, fondateur de l'entreprise, a inventé la petite culotte en 1918. Ce nouveau sous-vêtement a été une véritable révolution (Figure 1.12). La petite culotte remporte le Grand Prix de l'innovation lors de l'Exposition universelle de 1937. Elle est depuis toujours considérée comme la star de la lingerie. Suivront d'autres innovations produits telle que l'emmanchure américaine qui permet facilement de passer la tête et les bras du bébé pour lui enfiler son body ou encore l'invention de la bouclette velours pour des pyjamas toujours plus doux. Suivront de nombreuses autres innovations pour créer des vêtements toujours plus pratiques et confortables.

La crise des années 80 a mené l'entreprise à une forte délocalisation mais elle a su toujours garder une part de son savoir faire sur son site historique de Troyes, l'usine St Joseph (Figure 1.13). Ainsi, 45% du tricotage et de la teinture sont encore réalisés dans l'usine St Joseph à Troyes, les 55% restant étant effectués dans l'usine Petit Bateau créée en 1989 à Marrakech. Le rachat en 1986 par le Groupe Rocher a permis à l'entreprise de surmonter cette crise et de conserver ses emplois. La figure 1.14 donne quelques chiffres sur ce que représente la production de vêtements Petit Bateau.



FIGURE 1.12 – La petit culotte, une innovation Petit Bateau en 1918

Depuis décembre 2019, l'entreprise a pris un nouveau tournant avec l'adoption du statut d'entreprise à mission par le Groupe Rocher (Figure 1.15). Cet engagement fort souligne la volonté de faire de la mission sociétale de l'entreprise un élément aussi important que sa mission économique. Sa mission : "Reconnect people to nature". L'entreprise croit à l'impact positif de la nature sur le bien-être et particulièrement au sein de Petit Bateau, à l'impact sur le développement des enfants. L'entreprise s'engage à les accompagner vers une sensibilisation à la connexion aux autres et à l'environnement.

L'entreprise a toujours eu la volonté de se moderniser, de s'adapter aux nouveaux enjeux du monde et pour cela à innover. C'est dans cet esprit que la réalisation de cette thèse a été possible. Petit Bateau est venu s'entourer pour mener son entreprise vers un nouveau défi, devenir une usine 4.0.

1.3.3 Valeurs de l'entreprise

Depuis 2021, Petit Bateau a créé sa plateforme de marque autour des trois valeurs fortes suivantes :

- Liberté : pour que chaque enfant puisse bouger, créer et respirer librement dans ses vêtements Petit Bateau
- Qualité : pour une mode en toute confiance, une fabrication en toute transparence et une résistance à toutes épreuves
- Durabilité : pour des vêtements qui durent et un futur qui s'écrit dès aujourd'hui



FIGURE 1.13 – L’usine St Joseph de Troyes



FIGURE 1.14 – Petit Bateau en chiffres

L’engagement de Petit Bateau est de faire durer ses vêtements. Un vêtement de la marque a en moyenne 9 vies. L’entreprise cherche à travers sa marque à façonner une économie circulaire, réduire son empreinte environnementale, agir en fabriquant toujours plus responsable et dans la lignée du Groupe Rocher, connecter les enfants à la nature. Le logo de la marque a évolué pour reprendre ses valeurs (Figure 1.16).



FIGURE 1.15 – Groupe Rocher, une entreprise à mission



FIGURE 1.16 – Logo Petit Bateau de la nouvelle plateforme de marque

1.3.4 Cibles et univers produits

La devise de Petit Bateau a longtemps été "A chacun son Petit Bateau...". Cela se traduit dans la diversité des cibles de Petit Bateau au nombre de quatre :

- **Le bébé couché de 0 à 12 mois** : une collection proposant les produits liés à l'univers du bébé à la naissance, y compris les accessoires (gigoteuse, bavoir...).
- **Le bébé debout, de 3 à 36 mois** : des sous-vêtements et des vêtements de jour et de nuit pour les tout-petits (filles et garçons).
- **Le petit, de 2 à 12 ans** : des sous-vêtements et des vêtements de jour et de nuit pour les filles et les garçons.
- **L'adulte, de 12 à 20 ans (du XXS au XXL)** : une collection qui s'adresse essentiellement à la femme.

Les univers produits déclinés sur les différentes cibles sont : la puériculture, les vêtements de nuit, les sous-vêtements, les vêtements de jour et les accessoires. Cela représente une large diversité dans les produits à développer et à fabriquer.

1.3.5 Cycle de vie du produit

Un produit Petit Bateau a une vie composée de multiples étapes mais tout commence par sa conception.

Etape 1 : Plan de collection : un premier jet de couleurs, de matières, de formes prend vie. Puis, à partir de ce "brouillon", ces "envies" doivent trouver leur place dans un plan de collection qui fixe très précisément les règles du jeu, les objectifs et les contraintes de la nouvelle collection. Il est garant de l'atteinte du chiffre d'affaires, il respecte et met en valeur les options stratégiques choisies, il a pour objectif de définir le séquençement, développer et animer la saison en Mode.

Etape 2 : Concept de collection : après avoir analysé les tendances et l'air du temps, les stylistes choisissent les coloris, les tissus, les imprimés, les formes de vêtements et les détails de finition. Cet ensemble constitue le Concept de Collection, premier jet et fil rouge créatif, qui, une fois validé, sera affiné et interprété sur chacun des modèles.

Etape 3 : Développement du produit et 1^{er} prototype : tous les dessins d'imprimés, de motifs et de formes sont apportés à Troyes pour être réalisés dans les tissus sélectionnés. A partir de la Fiche Style, les modélistes, une fois la matière réalisée, transforment alors ces dessins en patrons et font réaliser les premiers prototypes qui évolueront au fil des essayages. Ce processus suppose une étroite collaboration entre le style, le marketing produit et le développement produit à Troyes.

Une fois la collection établie, il faut la fabriquer. La fabrication d'un produit se découpe en 12 étapes successives. La figure 1.17 détaille ces 12 étapes et les illustre par des photos : les fils sont achetés à différents fournisseurs validés par les équipes Petit Bateau sur différents critères, puis il est tricoté pour obtenir un Tricot Brut écru ou coloré (marinière) ; l'écru est ensuite teint, le rayé lavé dans de grandes machines à laver ; différents traitements sont appliqués pour donner certaines propriétés et pour garantir la stabilité des couleurs et des dimensions ; avant d'être coupé en suivant un patron, le tricot est étalé sur de longue table en matelas, plusieurs couches sont superposées pour couper l'ensemble d'un coup ; des décors par broderie ou sérigraphie peuvent ensuite être appliqués (positionnement d'un logo brodé...) ; les différentes pièces coupées peuvent ensuite être assemblées pour former le vêtement ; un contrôle permet d'assurer la qualité du produit ; enfin il est conditionné puis envoyé au centre d'expédition pour partir vers les différents points de vente.

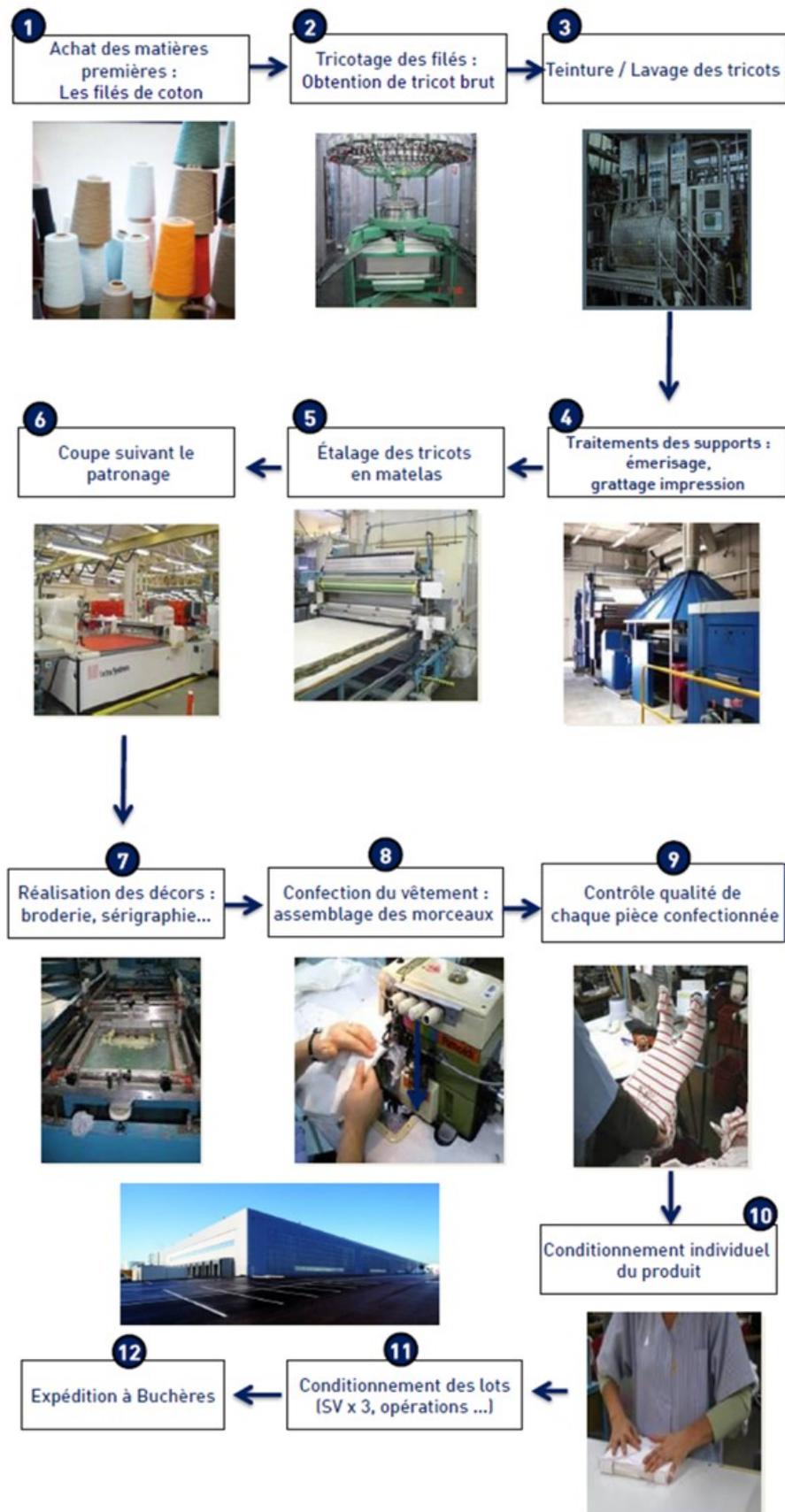


FIGURE 1.17 – Les 12 étapes du process de fabrication d'un produit Petit Bateau

Chaque étape fait l'objet de contrôles qualité stricts : il s'agit avant tout d'un ensemble de gestes et de valeurs qui composent les savoir-faire Petit Bateau partagés par l'ensemble de nos partenaires.

Pour les autres vêtements, soit environ 15% du total (principalement ceux en tissus/chaîne et trame), nous faisons appel à des partenaires qui disposent de savoir-faire différents du cœur de métier de la marque : la maille 2% par des partenaires sont en Europe (Pologne, Portugal), 11% en Asie (Chine, Vietnam, Inde, Birmanie, Thaïlande) et 2% dans l'Océan indien (Madagascar, Île Maurice). En plus des contrôles qualité, des audits sociaux sont menés chez les fournisseurs en Asie.

Après la production, il faut à présent, vendre le produit. Pour cela, Petit Bateau utilise 4 réseaux de distribution :

- **Les magasins** : fonds propres, magasins d'usine, concessions, franchises. Plus de 450 magasins dans le monde en 2017 (178 en France et 289 à l'international). Les boutiques de la marque se situent en France bien sûr, mais aussi à Milan, Berlin, New York, Tokyo, Londres ou encore Shanghai. Cela représente 70% du chiffre d'affaires total.
- **Internet et E-commerce** : 15 sites internet et 1 application mobile représentent 10% du chiffre d'affaires. Cette part a fortement augmenté depuis 2020 suite à la crise du Covid mais les chiffres ne sont pas encore communiqués officiellement.
- **Les GMS** : grandes et moyennes surfaces pour 8% du chiffre d'affaires
- **Le sélectif** : détaillants et corners dans les Grands Magasins complètent le chiffre d'affaires à hauteur de 12%.

1.3.6 Sites Petit Bateau

Comme indiqué en retraçant l'histoire de l'entreprise, Petit Bateau dispose donc de plusieurs sites :

- 2 usines : l'une en France, à Troyes, il s'agit de l'usine historique de la marque constituée des 3 ateliers de production (tricotage, teinture et confection). Plus de détails sont donnés sur ce site dans la suite de cette section car il s'agit du lieu d'application de la thèse. La seconde usine se situe au Maroc et comme en France, elle est composée d'un atelier de tricotage, d'un de teinture et enfin d'un atelier de confection.
- 1 plateforme logistique : située à Buchères, à quelques kilomètres de Troyes, tous les produits finis quelque soit leur lieu de production y transitent avant d'être distribués. Cette plateforme inaugurée en 2016 s'étend sur 43 hectares.

- 1 établissement administratif : situé à Paris, c'est le coeur de la création Petit Bateau. Les équipes styles et marketing y sont regroupées et profitent de l'effervescence parisienne, capitale de la mode, pour puiser leur inspiration et développer les nouveautés qui vont constituer la prochaine collection.
- 6 filiales commerciales : Allemagne, Italie, Belgique, Royaume-Unis, Espagne et Japon. Elles sont en charge de promouvoir la marque partout dans le monde et vendre les produits en connaissance des différences de marchés entre les pays.

Site de production de Troyes

Le site de production de Troyes dans lequel se positionnent les problématiques étudiées dans cette thèse est l'usine historique de Petit Bateau : l'usine St-Joseph. C'est ici que Pierre Valton a commencé son activité. Le site s'étend sur un peu moins de 20 000 m².

Comme pour le process général de fabrication détaillé plus haut, l'usine se décompose en trois ateliers :

- Le tricotage, avec un parc de 50 métiers à tricoter, où le fil brut ou teint va être travaillé pour devenir un tricot brut.
- La teinture, composée de plusieurs machines et étapes décrites ci-dessous.
- La confection, où le tricot précédemment teint va être confectionné selon le modèle prédéfini

Un plan de l'usine situant ces différents ateliers est présenté en figure 1.18. Sur ce plan, se situe en rouge le tricotage et l'arrivée des fils, en bleu les différentes machines de teinture réparties dans l'usine, en noir la confection et en vert le stock de tricot teint (entre la teinture et la confection).

Process de production

Au départ, le fil de coton arrive à l'usine après avoir subi un procédé de filature. Ce procédé permet d'obtenir différentes compositions, mélange de coton et lycra par exemple, et différentes formes de fil, telles que le monofilament, le multifilament, le retor (figure 1.19)... Chaque type de fil aura alors un aspect et un ressenti différent pour le porteur du vêtement. Il existe des fils de toutes les tailles, mais pour un fil textile, il n'est pas simple de mesurer le diamètre, notamment pour le coton dont la face latérale n'est pas circulaire. Le fil se caractérise alors par un titre ou un numéro métrique correspondant respectivement à une masse linéique et une longueur massique. Donc plus le numéro métrique sera grand, plus le fil travaillé sera fin. Dans les ateliers, le fil varie entre 28 Nm et 150 Nm. Le fil le plus utilisé est compris entre 50 et 60 Nm. Pour un fil de 50 Nm, un fil de 50 km pèse 1 kg. Le fil étant la matière première et donc la base de la production de Petit Bateau, le

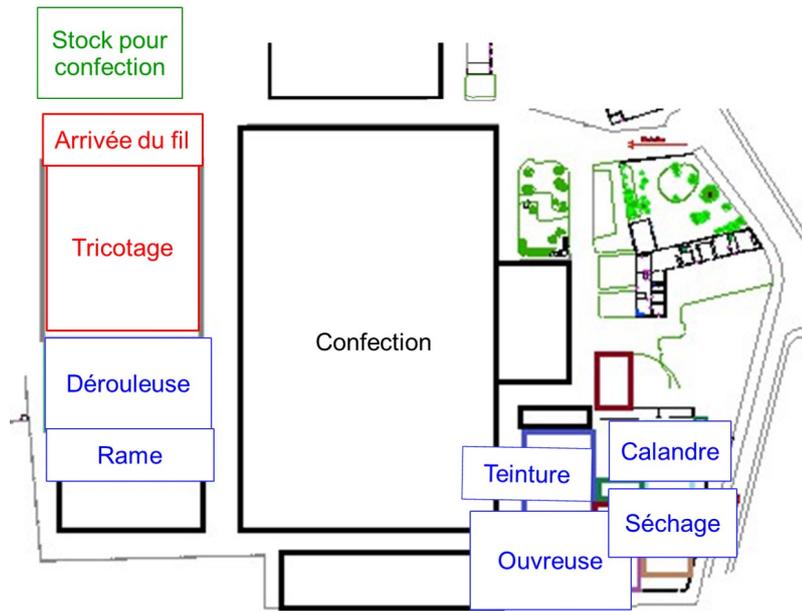


FIGURE 1.18 – Plan de l'usine Petit Bateau de Troyes

laboratoire de qualité du fil réalise de nombreux essais sur des échantillons avant de laisser un lot de fil entrer en production. Les tricots sont principalement réalisés avec du coton qui peut être écreu, teint ou chiné. La proportion du type de fil utilisé va dépendre des besoins de la collection. Une cartographie de la provenance des fils est donnée en figure 1.20.

Le premier contrôle consiste à prendre l'humidité des bobines car un fil trop sec risque de casser. Pour les cotons à teinte claire, il y a un contrôle de pollution (collage d'un adhésif à plusieurs endroits) pour vérifier s'il n'y a pas de fibres étrangères dans le lot. Les fils arrivent paraffinés pour les besoins de la bonneterie, il faut donc contrôler la quantité de paraffine sur l'échantillon. Le fil est alors utilisé pour faire des petits échantillons de tricot pour passer un test d'uniformité des couleurs, puis des tests de solidité. Le fil est aussi contrôlé en épaisseur, pour surveiller les irrégularités. Les tricots passent aussi un test de stabilité dimensionnelle et de tenue des colorants au lavage pendant 30min. Le dernier test contrôle la tenue à l'eau à 37°C pendant 4h, pour vérifier qu'il n'y aura pas de transfert de couleur sur la peau. Quand tous les tests ont été validés, le fil peut être utilisé sur les métiers à tricoter.

Pour former une maille de tricot, une aiguille est nécessaire et plusieurs étapes se succèdent puis se répètent. La figure 1.21 explique et schématise les 5 étapes pour former une maille à l'aide d'une aiguille. Pour former un tricot spécifique, il faut

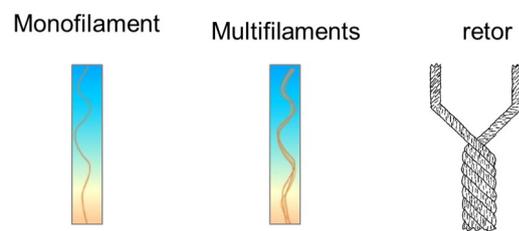


FIGURE 1.19 – Différentes formes de fil

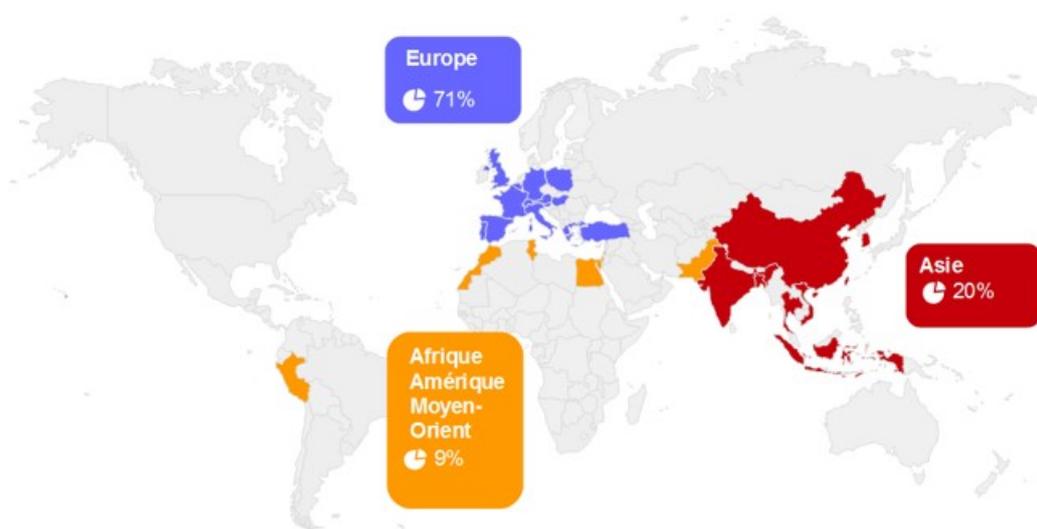
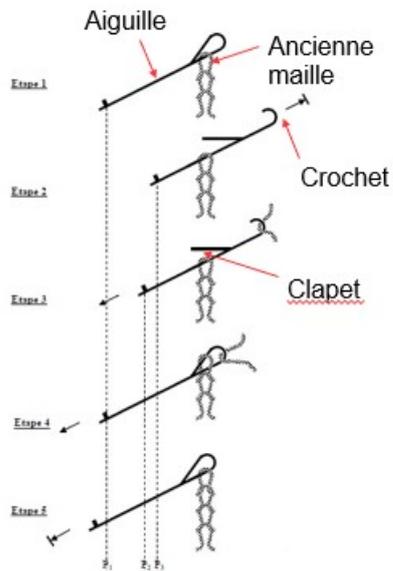


FIGURE 1.20 – Cartographie de la provenance des fils



- Étape 1 : l'aiguille est dans la position de départ. Elle retient la dernière maille prise par l'aiguille, appelée ancienne maille
- Étape 2 : l'aiguille monte, la maille glisse du crochet et va ouvrir le clapet.
- Étape 3 : L'aiguille redescend et récupère un nouveau fil
- Étape 4 : L'aiguille continue de descendre. L'ancienne maille referme le clapet, passe au-dessus du crochet et va se poser sur les pieds de la nouvelle maille.
- Étape 5 : L'aiguille arrive à son point le plus bas, ce qui donne la forme finale de la maille.

FIGURE 1.21 – Les 5 étapes de formation d'une maille

guider l'aiguille pour suivre un schéma de maille et ainsi dessiner le motif voulu. Pour guider l'aiguille, une platine est utilisée. L'ensemble platines / aiguilles forme ce qui est appelé une armure. C'est un élément important dans la composition d'un changement de tricot (support) sur une machine puisqu'il faut modifier l'ensemble à chaque fois. La figure 1.22 explique comment la platine est utilisée pour guider l'aiguille.

Grâce à la diversité de techniques utilisées dans l'usine de Petit Bateau en France, de nombreux supports différents peuvent être fabriqués par la maîtrise des différentes familles de mailles. Ceux-ci sont présentés dans la figure 1.23.

Le parc machine de l'usine est composé de 49 métiers. Un métier est composé de plus de 3 500 aiguilles. Le parc machine est composé de métiers de différentes marques et de différentes générations. Les principaux réglages sont le type d'action des aiguilles pour obtenir la maille voulue et l'apport du fil souhaité dans la longueur voulue. La majorité des métiers a une commande mécanique pour le travail des aiguilles et quelques uns ont une commande électrique. Celle-ci permet de réaliser des motifs beaucoup plus complexes que la mécanique. Un schéma illustratif d'un métier à tricoter est donné en figure 1.24. La bonneterie produit environ 25 tonnes de tricot par semaine, soit 45% de la production globale de Petit Bateau. Chaque métier est choisi et utilisé pour le domaine dans lequel il est le plus performant. Cela permet d'assurer un rythme de production élevé et de toujours respecter la qualité du cahier des charges. Petit Bateau se caractérise notamment par sa capacité à réaliser des mailles très serrées, ce qui permet d'avoir

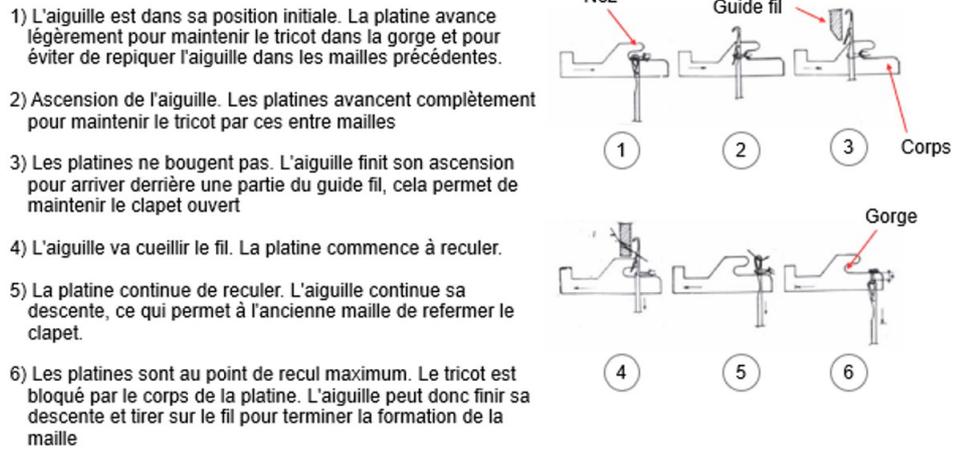


FIGURE 1.22 – Guide de l'aiguille via une platine



FIGURE 1.23 – Différentes familles de maille réalisées à Troyes

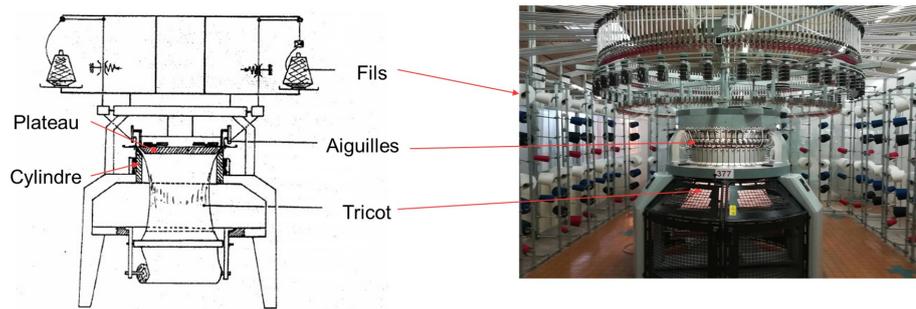


FIGURE 1.24 – Schéma d'un métier à tricoter

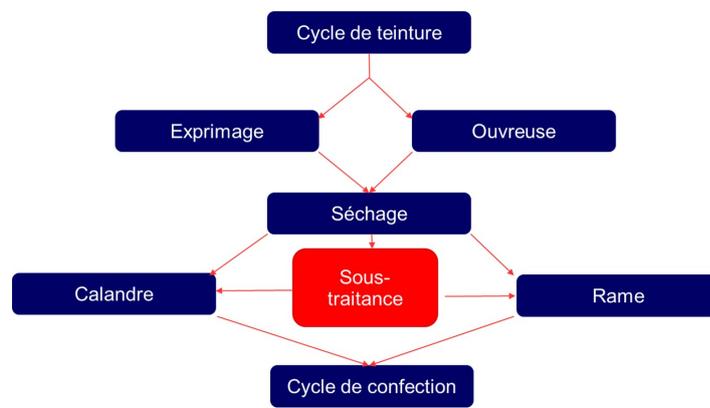


FIGURE 1.25 – Etapes de finition teinture

plus de solidité pour le tricot et une meilleure stabilité. Les métiers produisent à environ 32 tr/min (l'usage usuel en bonneterie est de 25tr/min) ce qui est rendu possible par le choix spécifique des métiers mais aussi par la capacité à bloquer la maille. Pour faire fonctionner le parc machine, des opérateurs, appelés bonnetiers y travaillent. Chaque bonnetier est capable de faire fonctionner 5 machines en simultané. L'atelier tourne sur 3 équipes du lundi matin 5h au vendredi soir 21h. Pour réaliser les modifications sur les machines pour passer d'un produit, support à un autre, des régleurs sont nécessaires. Les temps de changement peuvent varier entre 30 minutes et 4h s'il faut changer toutes les armures de la machine (démonter et remonter aiguilles et platines).

Pour la partie teinture et ce qui est appelé finition, plusieurs étapes sont nécessaires. L'enchaînement de ces étapes est donné par le graphique de la figure 1.25.

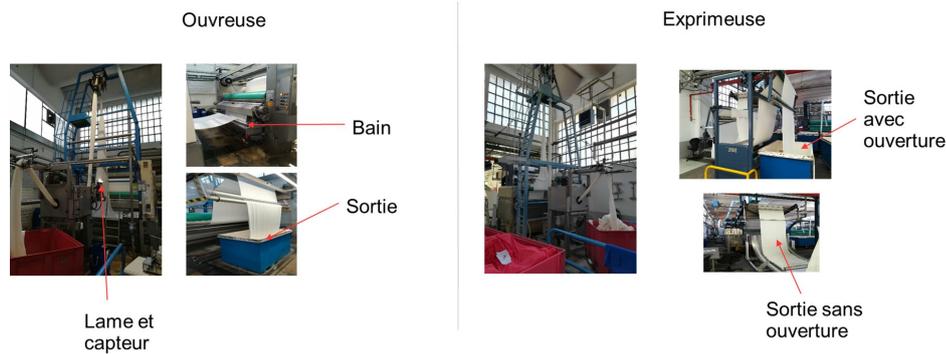


FIGURE 1.26 – Machines ouvreuse et exprimeuse

Le tricot à la sortie du cycle de teinture est gorgé d'eau, les mailles ont subi des contraintes et le tricot ne sort pas sous une forme précise. La finition va donc avoir pour objectif de dégorger le tricot de son surplus d'eau, de redresser les mailles avec une possibilité d'ouvrir le tubulaire ainsi que de passer dans un bain d'adoucissant pour éviter des trous à la confection. La finition va aussi permettre de relaxer le tricot, d'assurer sa stabilité et de le sécher. La dernière opération permet de mettre le tricot soit en rouleau soit en palette. Le tricot arrive directement après la teinture, à l'étape d'exprimage ou de l'ouvreuse. Il va dégorger du surplus d'eau, les mailles vont être redressées avec la possibilité de passer dans un bain d'adoucissant ou de colle pour éviter que les tricots roulent en lisière sur table de coupe. Le tricot a une forme drapée à la sortie de cette étape. L'ouvreuse et l'exprimeuse réalisent les mêmes actions à une seule différence près, l'ouvreuse ouvre forcément le tubulaire, comme son nom l'indique, avec l'aide d'une lame et d'un capteur alors que l'exprimeuse n'ouvre pas forcément le tubulaire (figure 1.26). Il reste alors 60% d'humidité à la sortie des ces machines.

Suite à cette étape, le tissu passe à l'étape du séchage. Le séchage va permettre de sécher le tricot mais aussi de relaxer la maille à l'aide d'un système de soufflerie. Deux séchoirs (figure 1.27) sont disponibles pour avoir une capacité de séchage suffisante par rapport à la production. Le tricot est transporté dans le séchoir sur un tapis roulant, ce qui permet d'avoir une température de séchage régulière sur toute la surface du tricot. Si la maille du tricot a tendance à faire rouler les bords du tricot, celui-ci passe sur une vis pour assurer l'ouverture totale et donc un bon séchage. Le séchage est réalisé par plusieurs brûleurs. Les brûleurs chauffent à 150°C et à 100°C pour la laine. Une soufflerie sur toute la longueur du tapis permet d'assurer la ventilation pour la relaxation du tricot.

Une fois sec, le tricot est dirigé vers la rame s'il est ouvert ou la calandre s'il est tubulaire. Que ce soit la rame ou la calandre, le but va être de fixer le tricot aux dimensions finales et d'assurer la stabilité dimensionnelle après lavage. La figure



FIGURE 1.27 – Machines séchoir

1.28 présente le fonctionnement de la rame tandis que la figure 1.29 présente celui de la calandre.

Petit Bateau fait appel à des partenaires sous-traitant pour la réalisation de certaines étapes n'appartenant pas à son coeur de métier :

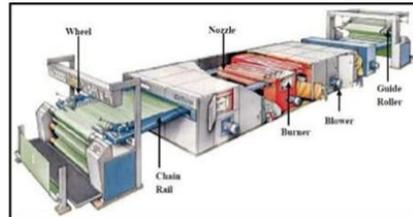
- Le rasage qui consiste à couper les bouclettes, ce qui permet d'obtenir un aspect velours sur les tricots.
- Le grattage : le tricot passe sur plusieurs brosses, l'opération a pour but de donner du volume au tricot.
- Le brossage qui consiste à broser le tricot, ce qui permet d'homogénéiser la matière et de retirer les petites fibres. Généralement réalisé après le rasage, cela permet de retirer les fibres coupées pendant le processus.

Avant d'être stocké pour l'utilisation de la confection, chaque lot doit passer par le contrôle de qualité. Le premier contrôle consiste à rechercher visuellement d'éventuels défauts. Le poids au mètre carré est ensuite contrôlé. Plusieurs tests sont réalisés pour observer le comportement du tricot dans des conditions réelles, par un test de stabilité :

- À l'eau, pour vérifier que le tricot ne va pas déteindre sur le porteur s'il a été mouillé
- Au séchage, pour vérifier que le tricot conserve sa forme initiale
- Au lavage, pour vérifier que le tricot ne va pas déteindre
- Aux frottements, pour vérifier que le tricot conserve sa teinte malgré les frottements

Si l'échantillon est validé, le tricot part au stockage pour la confection. Si l'échantillon n'est pas validé, il retourne en atelier pour retouche. Un contrôle de la largeur et de l'uniformité de la couleur est aussi réalisé.

Rame



Assure la stabilité dimensionnelle du tricot
Si nécessaire, encollage pour éviter que le tricot roule sur table de coupe
Chauffe à **130°C**



En sortie de rame, on controle les défauts sur la table de visitage



Formation de rouleau de **18kg maximum**

Mise sous plastique pour le stockage

FIGURE 1.28 – Machines rame

Calandre

Réglage en largeur de la machine via la fiche technique
Passage dans un coffre de vaporisation puis un plieur



FIGURE 1.29 – Machines calandre

Chiffres de production

Pour terminer ce chapitre et donner des éléments de compréhension pour la suite des chapitres, voici quelques chiffres de production :

- En moyenne, pour une collection, 1 Tricot Brut est décliné en 2,6 Tricot Teint (d'une couleur écru, il peut être teint ou imprimé en plus de 100 versions).
- De la même façon, en moyenne, 1 Tricot Teint va être utilisé dans 34 Produits Finis et jusqu'au maximum plus de 3 000 pour certains support emblématiques de la marque.

Le tableau 1.2 ci-dessous donne le nombre de Tricots Bruts, Tricots Teints et Produits Finis qui composent les collections Hiver 2020, Eté 2020, Hiver 2021 et Eté 2021. Les chiffres sont relativement stables d'une collection à l'autre pourtant entre l'hiver et l'été, les produits sont très différents.

Comme expliqué précédemment, le site de Troyes n'est pas seulement un site de production, il est également un site de développement. Le site industriel, le parc machine, les opérateurs, ne sont pas uniquement dédiés à la production en tant que telle. Ils sont amenés à réaliser sur les mêmes outils de production des pièces qui vont servir aux développements ou à la qualification de fournisseur. Ces besoins hors production ont une grande importance pour l'entreprise mais viennent

	H20	E20	H21	E21
Nombre de Tricots Bruts	218	207	199	180
Nombre de Tricots Teints	612	507	563	539
Nombre de Produits Finis	8 651	8 053	7 934	8 130

TABLEAU 1.2 – Nombre de produits par collection

perturber la gestion de la production. Cela demande une forte polyvalence de la part des ateliers. Ces demandes hors production planifiée pour le développement sont de 3 types :

- **Essai** : des essais sur des produits déjà connus sont réalisés pour qualifier de nouveaux fournisseurs. Par exemple, si un nouveau fournisseur de fils est envisagé, il faut d’abord vérifier que les fils fournis permettront au Tricot Brut puis au Tricot Teint de répondre aux critères qualités. La proportion est de 3% des demandes de production sur les deux ateliers.
- **Pièce type** : lors du développement d’un nouveau produit, il s’agit de la première pièce réalisée pour vérifier la faisabilité de la demande avec validation par le style du prototype. Sur le tricotage, cela vient considérablement perturber la production puisque ce sont les mêmes machines qui sont utilisées que pour la production parfois pour des pièces de seulement 14 kg. La proportion par rapport à l’ensemble de la production faite est de 11% en nombre d’ordres de fabrication et seulement 1% en quantité. Pour la partie teinture, de petites machines spécifiques pour ces proportions de pièces sont dédiées au développement. Cela se fait donc en parallèle de la production pour confection.
- **Échantillon** : il s’agit du premier lot de production qui permet de valider l’industrialisation du produit avant de passer à sa mise en production. C’est la dernière étape de validation. Ces demandes représentent 9% de la production de Tricots Bruts et 13% de Tricots Teints. Contrairement à la pièce type cela perturbe moins le flux de production car le lot peut être rapidement validé pour enchaîner sur la production donc en gardant les réglages de la machine.

Flux logistiques

Sur le site de Troyes, très peu de confection est réalisé (2% de la production). Une fois les supports tricotés et teints, ils sont donc envoyés vers d’autres sites de production : deux usines Marocaines, l’une appartenant à Petit Bateau, et une usine en Tunisie ne faisant pas partie de Petit Bateau. Les deux sites de confections Marocains sont majoritairement alimentés en support par l’usine Petit Bateau sur place. L’usine de Tunisie est majoritairement alimentée par la France.

Cependant, il arrive que des échanges soient faits en cas de besoins spécifiques. Après la confection, quelque soit le lieu de production France, Maroc ou Tunisie, tous les produits sont acheminés à l'entrepôt logistique de Buchères à quelques kilomètres de Troyes.

1.4 Conclusion

Face à l'émergence de nouveaux modes de production et de consommation, les entreprises doivent s'adapter. Une nouvelle révolution industrielle est en marche. Celle-ci repose sur les nouveaux systèmes connectés et communicants. Les entreprises font face à de nouveaux enjeux. Réactivité et agilité sont les maîtres mots de la performance sur toute la chaîne logistique. A présent, les entreprises se composent d'un ensemble de chaînes communicante entre elles sur les différents niveaux d'activité de l'industrie (vente, logistique, production). L'industrie textile a dû faire face à une importante crise à la fin des années 90 qui a fortement poussé à la délocalisation. Les emplois ont drastiquement diminué en France dans ce secteur d'activité pendant que les importations sont devenues majoritaires. Depuis la fin des années 2010, stabilise son niveau de production française qui ne décroît plus. Pour continuer sur cette tendance, il est important que ces entreprises longtemps en difficulté trouvent de nouvelles manières de fonctionner. Cela passe par la mise en place de nouveaux outils de travail. Ces outils doivent aider les utilisateurs à prendre des décisions rapides en ayant la bonne information au bon moment. Ils reposent sur des données qui doivent être le plus fiable possible et utilise des méthodes de résolution qui proviennent de la recherche. L'entreprise Petit Bateau a longtemps conservé les mêmes méthodes de travail. Il est important pour elle aujourd'hui, d'innover pour adapter son outil de production et sa chaîne logistique au monde d'aujourd'hui. La chaîne logistique composée de plusieurs sites de production génère d'important flux croisés sans valeur ajoutée. Les ateliers sont restés à l'identique depuis des années. Il est important de leur redonné de la flexibilité par exemple en revoyant l'agencement par rapport au mixe de production changeant. La demande client a évolué, les besoins ne sont plus les mêmes. La production doit s'adapter pour produire une variété de produit de plus en plus importante sur des quantités plus faibles. Il ne faut pas pour autant perdre en performance, en qualité et en satisfaction client. Dans les ateliers, de nombreux modes de fonctionnement reposent encore sur du travail manuel et des savoir-faire connu d'une seule personne. Il est important de réussir à pérenniser dans le temps ces process et à aider les collaborateurs dans leur travail pour réduire les tâches à non valeur ajoutée. C'est également un moyen d'optimiser les performances de l'atelier en utilisant des méthodes de calcul plus performantes. A Petit Bateau, l'ordonnancement des ateliers est par exemple réalisé toutes les semaines. De nombreuses contraintes comme

les temps de changement ou la capacité de l'atelier compliquent le problème. L'objectif de cette thèse est d'accompagner l'entreprise Petit Bateau vers une usine 4.0 équipée d'outils d'aide à la décision. Plusieurs problématiques de l'entreprise ont été étudiées pour analyser l'intérêt de certains projet ou d'aider à prendre des décisions autrement. Dans la suite de cette thèse, chaque chapitre va traiter d'un problème étudié. Les méthodes utilisées sont présentées ainsi que les résultats, les conclusions obtenus et les décisions de l'entreprise de mise en application des outils.

Chapitre 2

Problème d'allocation dynamique de produit

Sommaire

2.1	Description du problème	38
2.2	État de l'art	41
2.3	Méthode de résolution	43
2.4	Campagnes de tests numériques	46
2.5	Conclusion	51

Résumé

Ce chapitre traite d'un problème de décision stratégique dynamique au niveau de la chaîne logistique dans l'industrie textile et plus spécifiquement celle de Petit Bateau. La chaîne logistique étudiée est composée de plusieurs sites de production pour les trois étapes qui composent le processus de fabrication. Les produits peuvent être groupés en 16 catégories différentes. Les coûts logistiques et de production sont majoritairement dûs aux coûts de transport. L'objectif de l'étude menée est de déterminer où fabriquer chacun des produits pour satisfaire la demande d'assemblage des différents sites de production. Ce problème n'a jamais été étudié dans le contexte d'application de l'industrie textile. Un modèle mathématique basé sur une représentation par graphe est proposé. Ce chapitre se conclut par la présentation des résultats obtenus.

Publication

A. Berthier, H. Chehade, A. Yalaoui, C. Bouillot, L. Amodeo, F. Yalaoui, Case study of supply chain in textile industry : a dynamic product allocation decision problem, in : 13ème conférence internationale de Modélisation, Optimisation et Simulation (MOSIM2020), 12-14 Nov 2020, AGADIR, Maroc, 2020.

2.1 Description du problème

Dans toutes les industries, la chaîne logistique est l'une des parties les plus importantes de son organisation. La conception de cette chaîne a une très grande influence sur le reste du système. Les coûts associés ne sont pas négligeables et sont composés des coûts de stockage, de production et de transports. Le délai de mise à disposition des produits varie selon les décisions stratégiques prises et le taux de service peut être significativement impacté. La révolution de l'industrie 4.0 est en passe d'accélérer les transformations de la chaîne logistique. Cela augmente la nécessité d'être agile et flexible pour s'adapter aux changements constants du marché. Les transports de produits doivent être réduits au maximum pour économiser du temps et de l'argent. L'enjeu écologique et durable des entreprises est également de plus en plus important et conscient. Sa prise en compte concrète passe par une gestion intelligente de cette chaîne logistique.

Le cas étudié dans ce chapitre vient de la réalité rencontrée dans l'entreprise Petit Bateau. La production de cette entreprise se répartie en 3 étapes qui ont été décrites dans le chapitre 1 mais qui vont être rapidement reprises ici :

- La première étape consiste à tricoter des rouleaux de tissus à partir de fils de coton.
- La seconde étape permet de donner au tissu ses propriétés de couleurs et de résistance.
- La dernière étape permet l'obtention du vêtement final. Les rouleaux de tissu sont coupés en pièces et celles-ci sont assemblées ensemble.

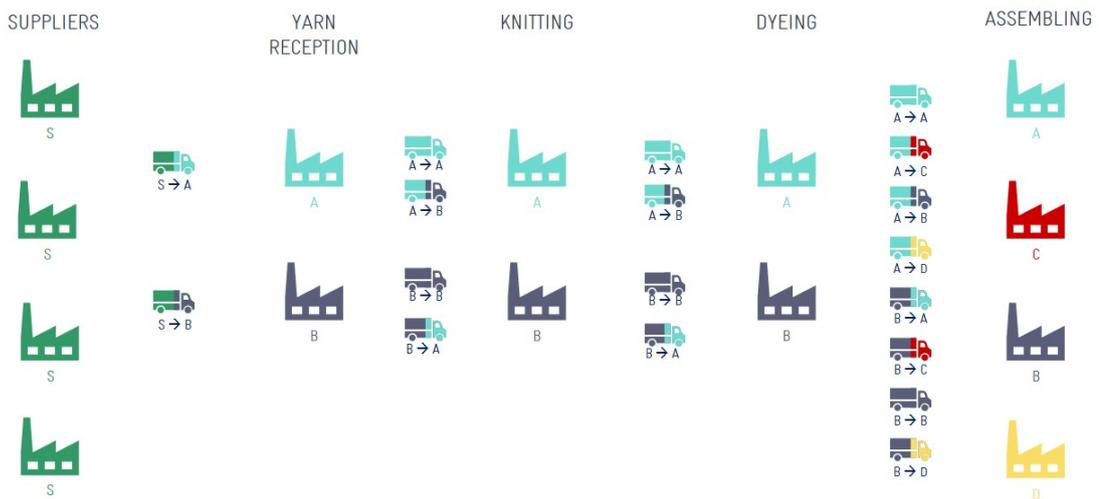


FIGURE 2.1 – Représentation de la répartition de la chaîne logistique du cas industriel de Petit Bateau

Pour chaque étape, plusieurs sites de production sont éligibles, chacun avec un coût de production différent selon le pays de production. Actuellement, dans ce cas industriel, deux sites sont possibles pour les étapes de tricotage et de teinture (France et Maroc) et quatre pour l'opération d'assemblage (1 en France, 2 au Maroc et 1 en Tunisie). Des flux de transport sont alors nécessaires si un produit change de site de production entre deux étapes : par exemple tricotage en France, teinture au Maroc puis confection en Tunisie, il y a un flux de transport entre chaque étape de production. Un changement de site a un impact sur le stockage en plus du coût de transport. Les matières premières utilisées (fils) viennent de quatre fournisseurs avec des prix d'achat et des coûts différents. Le coût varie selon le lieu de livraison de la marchandise. La figure 2.1 dessine le flux logistique avec les différentes possibilités de site de production à chaque étape de production des fournisseurs aux usines d'assemblage. Chaque lettre correspond à un lieu de production :

- A : France
- B et C : Maroc
- D : Tunisie

Les sites A et B peuvent faire les trois étapes de production (tricotage, teinture et assemblage) alors que les sites C et D ont uniquement la compétence de faire l'opération d'assemblage. Chaque site (A et B) est soumis à une capacité de production limitée.

Dans le cas d'étude, dû à leur large diversité, les produits sont groupés en 4 familles. A chaque étape, à l'exception de l'assemblage, les sites disponibles sont compétents pour faire tous les produits. L'opération de teinture a un coût de production qui varie en fonction de la famille technique de produit. C'est pourquoi, les familles sont classifiées uniquement en fonction de l'étape de teinture (Figure 2.2) :

- Blanc : un tissu écru est transformé en tissu de couleur blanche
- Imprimé : un tissu fond d'impression (coloré) est imprimé d'un motif utilisant un processus spécifique d'impression
- Lavé : le tissu est tricoté directement à partir de fils teints. L'opération de teinture consiste uniquement à appliquer un cycle de lavage au tissu
- Teint : un tricot écru est coloré de manière unie. Plus la couleur appliquée est foncée, plus le processus est complexe et long en temps

Pour chaque lieu de production, la proportion de chaque famille est connue et déterminée par le processus de fabrication. Par exemple, 15% de la production de produits "Blanc" sera confectionnée sur le site C donc au Maroc. La table 2.1 présente la répartition des familles de produits selon les lieux de production sur



FIGURE 2.2 – Photos de tissus correspondant aux quatre familles

les différents sites d'assemblage. Cette répartition est déterminée par les équipes développement et logistique par rapport aux produits finis confectionnés sur chacun des sites de confection. Chaque site d'assemblage est spécialisé dans un type de produit fini. Par exemple, le site C est spécialisé dans les sous-vêtements alors que le site D est spécialisé dans les vêtements pour adultes. Ces deux catégories de produits finis sont composées des mêmes familles de produits (tissus) mais n'utilisent pas les mêmes techniques de production pour obtenir ces différents produits finis. Une petite culotte et un tee-shirt femme peuvent être fait avec le même tissu imprimé de petite fleur. Une partie de ce tissu sera donc affecté au site C (Maroc) qui confectionne les sous-vêtements et une seconde partie au site D (Tunisie) pour les vêtements adulte. L'outil déterminera où ce tissu doit être fabriqué pour alimenter ces deux sites de confection en fonction de leur besoin.

Chaque famille de produit est divisée en 4, une division pour chaque lieu de production. Finalement, il y a donc 16 catégories de produits groupés par famille de teinture et lieu d'assemblage. Le site de production correspond à la dernière affectation de la catégorie de production. Ce chapitre cherche à répondre à la question suivante : où produire chaque tissu à chaque étape du processus, pour répondre aux besoins logistiques des sites d'assemblage, la dernière étape avec le coût le plus

	A	B	C	D
Blanc	3%	13%	15%	70%
Imprimé	1%	24%	25%	50%
Lavé	3%	28%	27%	42%
Teint	1%	22%	25%	52%

TABLEAU 2.1 – Répartition des produits finis par site d'assemblage pour chaque famille de produit

faible possible sur la totalité de la chaîne. Cela représente une décision stratégique d'affectation qui est effectuée tous les 6 mois à l'arrivée de la nouvelle collection. Un fichier est rempli manuellement pour affecter la production des produits aux différents sites en fonction de plusieurs critères qui sont regardés : capacité du site, compétences pour faire le produit, historique sur des références similaires... Un modèle de décision dynamique sera extrêmement utile pour l'entreprise. Aujourd'hui, une équipe entière est dédiée à décider où sera manufacturé chaque produit à chaque étape de production d'une collection. Ils travaillent uniquement à l'aide d'outils de calcul standard sans aucune aide à la décision. Cette étude cherche donc à aboutir à un outil d'aide à la décision pour aider cette équipe dans son travail quotidien. Le problème de décision consiste à déterminer quelle quantité de la catégorie de produit doit être affectée à chaque site.

La section suivante présente un état de l'art sur les problèmes similaires de la littérature. De nombreuses études se sont intéressées aux flux logistique et aux problèmes d'allocation de produits sur différents sites de production, d'entreposage ou de ventes.

2.2 État de l'art

La chaîne logistique d'une entreprise inclut toutes les activités relatives aux flux des produits depuis l'approvisionnement en matières premières jusqu'aux produits finis (Parsanejad et Nayebi (2020)). Il existe en plus du flux de produits (production), deux autres flux : le flux financier et celui d'informations (Giannocaro et Pontrandolfo (2002)). Ces trois flux interagissent ensemble et aboutissent au fonctionnement de l'entreprise dans sa globalité. Le management de la chaîne logistique est un regroupement de plusieurs méthodes utilisées pour intégrer au mieux dans la chaîne les différentes entités (fournisseurs, producteurs, entrepôts, magasins, etc.). Elle inclut toutes les étapes directes comme indirectes qui sont impliquées dans la réponse à une demande de la part d'un client. C'est pourquoi, sont également considérés, les espaces de stockage, le transport et même le client lui même.



Figure 7. Categories of objectives pursued in the selected papers.

FIGURE 2.3 – La fonction objectif la plus étudiée est la fonction coût (Di Pasquale *et al.* (2020))

Avec les changements constants et rapides du monde d'aujourd'hui, particulièrement en économie et en politique, les responsables des opérations doivent répondre à des questions précises telles que la suivante (Tsiakis et Papageorgiou (2008)) : quel mixe de produits réaliser sur chaque site de production ? Il existe de nombreux travaux abordant les problèmes d'allocation de produits et de distribution dans la littérature. Des MIP ont été développés pour allouer les demandes des clients à des entreprises de production de différents pays pour réduire les coûts de production et de transport (Aydinel *et al.* (2008)). La nécessité de développer des modèles de planning stratégiques et tactiques a été reconnue par le monde industriel depuis de nombreuses années. En particulier, en utilisant des approches quantitatives plutôt que qualitatives (Shapiro (2004)). Cela a créé de nombreux challenges à la fois pour les chercheurs mais également pour les entreprises qui souhaitent implémenter, avec succès, des outils d'aide à la décision portés sur les décisions de la chaîne logistique. L'auteur Di Pasquale *et al.* (2020) a réalisé un état de l'art des problèmes d'allocation de demande sous la perspective de la chaîne logistique. De ses travaux, nous pouvons dégager deux conclusions :

- La fonction objective la plus étudiée est la fonction coût (Figure 2.3)
- Aucun auteur n'a étudié le cas de la chaîne logistique de l'industrie textile

Les premiers essais d'amélioration des performances de la chaîne logistique se sont majoritairement concentrés sur l'aspect logistique plutôt que sur la décision économique associée. Dans une première étude, Arntzen *et al.* (1995) ont développé un modèle MIP nommé "modèle de la chaîne logistique globale" ayant pour objectif de déterminer : le nombre et la localisation des centres de distribution, l'af-

Secteurs	Nombre de papiers
Automobile	7
Intégrateur de services logistiques	7
Fabrication électronique	5
Fabrication (papier, ferroviaire...)	4
Chaîne logistique alimentaire	4
Industrie plastique	2
Logistique de l'habillement (boutiques)	1
Industrie des bio-énergie	1
Bâtiment	1
Pharmaceutique	1

TABLEAU 2.2 – Répartition des secteurs étudiés (Di Pasquale *et al.* (2020))

fectation des clients aux centres, le nombre d'échelons et l'affectation des produits aux centres. L'objectif du modèle est la minimisation d'une combinaison pondérée entre le coût total et les jours d'activités. Guinet (2001) a étudié l'économie d'un système de production multi-sites avec une approche à deux niveaux. Le premier niveau consiste à affecter les produits aux sites et le second à ordonnancer l'atelier. Panicker *et al.* (2013) ont résolu un problème de transport avec des coûts fixes. A chaque route sont associés une charge fixe et un coût de transport par unité. L'auteur a utilisé un algorithme de colonies de fourmis pour résoudre ce problème sur une chaîne logistique à deux niveaux (avec une étape de production puis une étape de vente par exemple).

Après cet état de l'art sur les problèmes d'allocation de produits, la section suivante présente la méthode de résolution qu'il a été choisie d'appliquer. Celle-ci repose sur le développement d'un modèle mathématique basé sur une représentation par graphe.

2.3 Méthode de résolution

Dans l'objectif de résoudre le problème d'allocation dynamique de produit au sein de la chaîne logistique présentée dans ce chapitre, la chaîne logistique est représentée sous forme d'un graphe. Le problème pose la question de l'affectation des différentes familles de produits sur les sites de production capable de les réaliser, cela en minimisant le coût total comprenant le stockage, la production et le transport. Un modèle mathématique basé sur cette représentation en graphe permet de résoudre ce problème.

La figure 2.1 peut être convertie comme le graphe de la figure 2.4. Cette représentation nécessite 30 noeuds. Soit k une catégorie de produit et i et j des noeuds

distincts. Sur chaque arc, une valeur de coûts c_{kij} peut être associée ainsi qu'une variable de décision x_{kij} pour déterminer la quantité affectée pour chaque catégorie de produit k entre les noeuds i et j . Pour résoudre le cas le plus générique possible, un coût fixe f_{ij} et une variable binaire b_{ij} sont utilisés pour prendre en compte un coût d'ouverture entre les noeuds i et j .

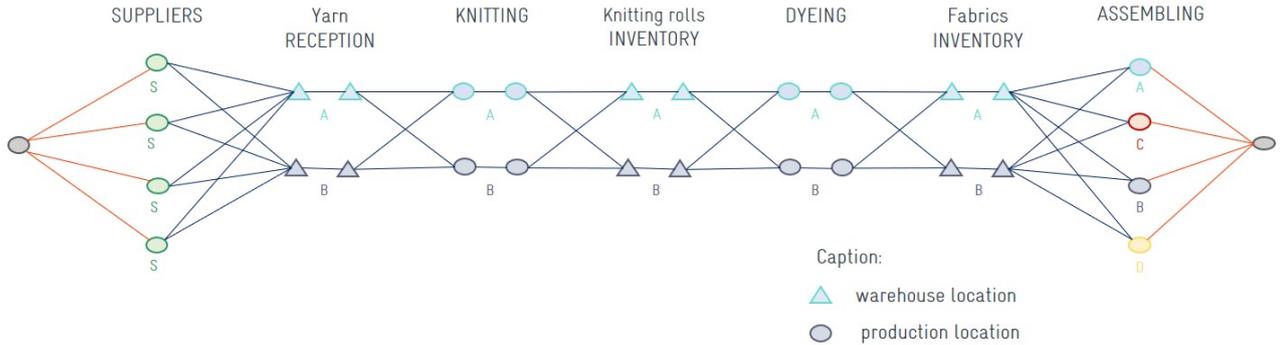


FIGURE 2.4 – Représentation de la chaîne logistique sous forme d'un graphe

Les quantités affectées aux arcs de la première partie du graphe (à partir du premier noeud) sont connues (approvisionnement par les fournisseurs). Les quantités achetées à chaque fournisseur sont connues en avance et ne font pas partie du champ de décision. De manière similaire, les quantités de la dernière partie (vers le dernier noeud) sont aussi pré-déterminées (table 2.1). La proportion de chaque catégorie de produits sur chaque site d'assemblage est connue dans cette étude. Les sites d'assemblage sont considérés comme les clients de la chaîne logistique. Sur tous les autres arcs, une variable de décision x_{kij} détermine la quantité optimale de la catégorie de produit k à affecter entre les sites correspondants aux noeuds i et j . Comme cela est expliqué dans la description du problème de ce chapitre (section 2.1), le nombre de catégories de produits est de $K = 16$ selon la répartition des produits par familles et par sites d'assemblage.

2.3.1 Notations

- \mathcal{N} : Ensemble des noeuds
- $N \in \mathbb{N}$: Nombre de noeuds du graphe
- $i, j = 1 \dots N$: Indice de noeuds
- \mathcal{K} : Ensemble des catégories de produits
- $K \in \mathbb{N}$: Nombre de catégories de produits
- $k = 1 \dots K$: Indice des catégories de produits

$c_{kij} \in \mathbb{R}$: Coût logistique monétaire par catégorie de produit k ($k \in \mathcal{K}$) entre les noeuds i et j ($i, j \in \mathcal{N}$)

$f_{ij} \in \mathbb{R}$: Coût fixe entre les noeuds i et j ($i, j \in \mathcal{N}$)

$d_k \in \mathbb{N}$: Dernier noeud d'affectation de la catégorie k ($k \in \mathcal{K}$) (site de l'opération d'assemblage)

$q_k \in \mathbb{N}$: Quantité de la catégorie k ($k \in \mathcal{K}$) à affecter sur l'ensemble de la chaîne

$capa_{ij} \in \mathbb{N}$: Capacité maximale entre les noeuds i et j ($i, j \in \mathcal{N}$)

2.3.2 Variables de décision

$x_{kij} \in \mathbb{N}$: Quantité de la catégorie de produit k ($k \in \mathcal{K}$) affectée entre les noeuds i et j ($i, j \in \mathcal{N}$)

$b_{ij} \in \{0, 1\}$: Égal à 1 si des quantités sont affectées sur l'arc i, j ($i, j \in \mathcal{N}$), 0 sinon

Les variables de décision déterminent sur chaque arc la quantité à transporter pour chaque catégorie de produits. Cela garantit la représentation complète du mouvement du produit à travers les différentes étapes en tenant compte des contraintes de la section 2.3.4.

2.3.3 Fonction objectif

$$\begin{aligned} \text{Minimisation } \sum_{k \in \mathcal{K}} \sum_{i \in \mathcal{N}} \sum_{j \in \mathcal{N}, i \neq j} x_{kij} c_{kij} \\ + \sum_{i \in \mathcal{N}} \sum_{j \in \mathcal{N}, i \neq j} b_{ij} f_{ij} \end{aligned} \quad (2.1)$$

La fonction objectif (2.1) minimise le coût total de la chaîne logistique. Le coût c_{kIJ} prend en compte les coûts de production, de transport et de stockage par unité. Le coût f_{ij} représente le coût d'ouverture d'un site.

2.3.4 Contraintes

$$\sum_{j \in \mathcal{N}} x_{k1j} = q_k, \forall k \in \mathcal{K} \quad (2.2)$$

$$\sum_{j \in \mathcal{N}} x_{kNj} = 0, \forall k \in \mathcal{K} \quad (2.3)$$

$$\sum_{i \in \mathcal{N}} x_{ki1} = 0, \forall k \in \mathcal{K} \quad (2.4)$$

$$\sum_{j \in \mathcal{N}} x_{kij} = \sum_{j \in \mathcal{N}} x_{kji}, \forall k \in \mathcal{K}, i = 2 \dots N - 1 \quad (2.5)$$

$$\sum_{i \in \mathcal{N}} x_{kij} \leq q_k, \forall k \in \mathcal{K}, \forall j \in \mathcal{N} \quad (2.6)$$

$$x_{kd_k N} = q_k, \forall k \in \mathcal{K} \quad (2.7)$$

$$\sum_{k \in \mathcal{K}} x_{kij} \leq \text{capa}_{ij}, \forall i, j \in \mathcal{N} \quad (2.8)$$

$$\sum_{k \in \mathcal{K}} x_{kij} \leq \sum_{k \in \mathcal{K}} q_k * b_{ij}, \forall i, j \in \mathcal{N} \quad (2.9)$$

La contrainte (2.2) initialise le premier noeud avec les quantités totales de chaque catégorie de produit k . La contrainte (2.3) termine le flux au noeud N pour chaque catégorie de produit k . La contrainte (2.4) commence le flux au premier noeud. La contrainte (2.5) assure la conservation du flux entre les entrées et les sorties de chaque noeud. La contrainte (2.6) garantit qu'il n'y a pas de flux retour. La contrainte (2.7) assure que le flux de chaque catégorie de produits k termine à chaque noeud d_k connu par les données de la dernière étape de production. La contrainte (2.8) assure le respect des capacités entre les différents noeuds. La dernière contrainte (2.9) détermine la valeur de la variable b_{ij} de chaque arc, celle-ci prend la valeur 1 si une quantité est affectée sur l'arc et 0 sinon.

Le modèle présenté dans cette section a ensuite été appliqué dans un premier temps sur des instances théoriques de la littérature puis dans un second sur les données réelles de Petit Bateau. La section suivante présente les résultats obtenus sur ces deux campagnes de tests.

2.4 Campagnes de tests numériques

2.4.1 Tests théoriques

Dans une première étape, le modèle a été testé sur les instances de [Panicker et al. \(2013\)](#) qui traitent d'un problème très proche. La différence entre l'approche de modélisation de l'auteur et la notre, est qu'il a segmenté son modèle par niveau de la chaîne logistique. Il a étudié une chaîne logistique à 2 niveaux :

- De l'usine vers le distributeur
- Du distributeur vers le vendeur

Sa fonction objectif est donc en deux parties. Dans notre contribution, nous avons voulu le modèle le plus générique possible et facilement adaptable sur du multi-niveaux. La modélisation est donc indépendante du nombre de niveaux que comprend la chaîne logistique et la fonction objectif composée d'un élément n'est pas modifié si des niveaux sont ajoutés ou retirés, ceci grâce à la représentation par graph que nous avons proposée.

Les 20 instances proposées sont résolues avec une heuristique de colonie de fourmis et un algorithme génétique dans cette étude de la littérature (Panicker *et al.* (2013)). Ces instances couvrent une large diversité de situations avec une augmentation de la complexité. Avec notre modèle mathématique, nous avons résolu l'ensemble des instances et trouvé la solution exacte, ce qui n'avait pas été fait précédemment. La table 2.3 montre les résultats obtenus sur les 20 instances. Sur l'ensemble des instances, la solution de huit d'entre elles a été améliorée.

Instance	Taille du problème $i * j * k$	Coût total de distribution			Pourcentage de déviation	
		Solution exacte (Z)	Solution ACO (Z')	Solution GA (Z'')	$(Z - Z')/Z' * 100$	$(Z - Z'')/Z'' * 100$
1	2*2*3	112 600	112 600	112 600	0,000	0,000
2	2*2*4	237 750	237 750	237 750	0,000	0,000
3	2*2*5	180 450	180 450	180 450	0,000	0,000
5	2*2*7	162 490	162 490	162 490	0,000	0,000
6	2*3*4	59 500	59 500	50 500	0,000	0,000
7	2*3*4	32 150	32 150	32 150	0,000	0,000
8	2*3*6	65 945	69 045	69 670	-4,490	-5,347
9	2*3*8	258 730	258 730	264 680	0,000	-2,248
10	2*4*8	77 400	80 900	85 200	-4,326	-9,155
11	2*5*6	75 065	80 865	94 565	-7,172	-20,621
12	3*2*4	47 140	47 140	47 140	0,000	0,000
13	3*2*5	175 350	178 950	178 950	-2,012	-2,012
14	3*3*4	57 100	57 100	57 100	0,000	0,000
15	3*3*5	152 800	152 800	152 800	0,000	0,000
16	3*3*6	132 890	132 890	132 890	0,000	0,000
17	3*3*7	99 095	105 715	106 615	-6,262	-7,053
18	3*3*7	281 100	281 730	302 350	-0,224	-7,028
19	3*4*6	76 900	77 250	83 500	-0,453	-7,904
20	4*3*5	118 450	118 450	118 450	0,000	0,000

TABLEAU 2.3 – Résolution des instances de la littérature Panicker *et al.* (2013)

2.4.2 Tests sur des instances Petit Bateau

Dans un second temps, le modèle a été testé sur un jeu de données réelles. Celui-ci ne considère pas de coût fixe car il n'y a pas de décisions d'ouverture ou de fermeture de site. Cette partie de l'objectif est donc mise à zéro et la variable b_{ij} n'est pas utile dans ce cas. Par conséquent, la contrainte 2.9 n'est pas utilisée. Dans le cas industriel, 16 catégories de produits ont été établies :

- 4 familles de flux : banc, impression, lavage, teinture
- 4 sites d'assemblage

Pour obtenir les données, nous avons extrait l'historique de production sur chaque site de production et à chaque étape (tricotage, teinture, confection). De là, nous avons pu analyser pour en déduire les proportions de chaque famille confectionnées sur chaque site qui ne doivent pas changer et les capacités maximum à respecter sur les sites de tricotage et teinture. Nous avons avec cette analyse, une vision de ce qui a été fait dans la réalité et nous pouvions sur le même jeu de données, montrer ce qu'il est possible de gagner en utilisant le modèle mathématique proposé. Deux hypothèses ont été nécessaires :

- Le volume de tissus consommé par chaque site de production reste le même. Les pertes de matière ne sont pas considérées notamment entre le tricotage et la teinture.
- Le volume de fils approvisionné par chaque fournisseur est connu pour chaque catégorie de produit.

Le modèle mathématique a été résolu à l'aide du solver CPLEX-ILOG avec un processeur Intel Core i5.

Le coût total (transport, production et stockage) a été réduit de 3% sur l'ensemble de la chaîne logistique. Mais les coûts de transport ont été réduits de **37%** ce qui est la réduction la plus impactante de cette étude. Le coût total ne décroît pas de manière significative car il a été choisi de maintenir les niveaux de production sur les différents sites. Le coût de production est donc relativement identique. L'amélioration majeure, en revanche, est la rationalisation des flux croisés. Dès le début de la chaîne, les produits sont fabriqués au plus près de leur lieu d'assemblage. L'évolution est visible par la comparaison des figures 2.5 et 2.6. Sur ces figures, plus les lignes sont larges et plus il y a de quantités associées à ce flux. La première figure représente la répartition de la production sur chaque site et les flux de transport qui sont ainsi générés initialement. La seconde image, représente les mêmes données mais réparties avec l'utilisation du modèle MILP. De manière indéniable, la présence de flux croisés est bien moins importante sur la seconde image (figure 2.6).

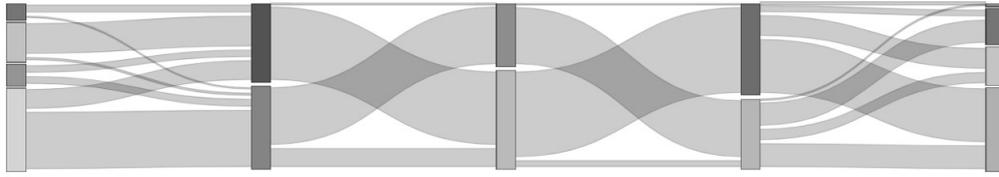


FIGURE 2.5 – Proportions initiales des produits entre les différents sites de la chaîne logistique

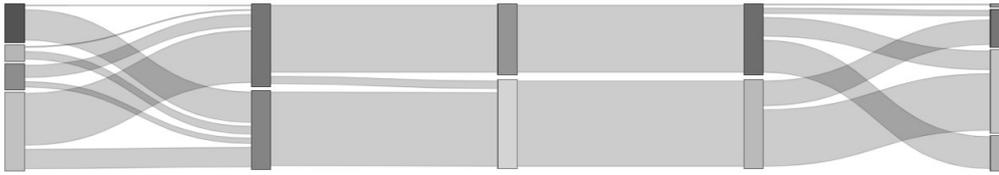


FIGURE 2.6 – Proportions finales des produits entre les différents sites de la chaîne logistique

Le dernier transport, entre le lieu de teinture et le site d'assemblage est le plus onéreux puisque le produit a une valeur plus importante. Pour aller de la localisation B (Maroc) à D (Tunisie), le produit doit passer par le site A (France). Le tableau 2.4 compare les flux de transports initiaux et ceux proposés par le modèle entre la teinture et l'étape d'assemblage. Le flux entre les sites B et D ont été réduits de 88% au profit (+33%) de transport entre les sites A et D plus proches.

Ces résultats peuvent être utilisés par l'entreprise comme un outil de décision dynamique pour affecter les nouveaux produits de chaque lancement de collection. Cela représente un outil de décision à un niveau stratégique pour l'entreprise. Cette décision est prise deux fois par an donc tous les six mois. Il permet d'accompagner les équipes dans leur décision en optimisant les coûts logistiques de la chaîne vers les coûts les plus faibles possibles en considérant les paramètres actuels.

2.4.3 Mise en application réelle

L'objectif initial du projet de Petit Bateau sur ce problème est de revendiquer la fabrication française de ses supports "iconiques" (marinières, côtes...). Pour répondre à ce défi, Petit Bateau a lancé un projet pour accompagner la marque dans sa démarche de transparence avec la revendication du "Tricoté en France" pour les tricots iconiques et la réduction des coûts de production des tricots :

- par une nouvelle stratégie d'affectation sur les sites France et Maroc
- par une spécialisation et optimisation des productions par site

		A	B	C	D
Blanc	A	87%	263%	340%	29%
	B	-100%	-57%	-59%	-100%
Imprimé	A	39%	-78%	-77%	34%
	B	-100%	65%	58%	-100%
Lavé	A	6%	83%	50%	51%
	B	-100%	-37%	-30%	-100%
Teint	A	17%	-100%	-100%	18%
	B	-54%	74%	45%	-55%
Total	A	27%	-35%	-15%	33%
	B	-90%	21%	7%	-88%

TABLEAU 2.4 – Différence de flux de transport entre les étapes de teinture et d'assemblage entre la chaîne logistique initiale et celle proposée par le modèle MILP par familles de produits

L'étude a été menée pour analyser l'intérêt de ce projet de revendication du tricoté/teint en France. Grâce à l'outil mis en place, l'analyse et les résultats ont montré qu'en l'état, le projet apporterait des gains sur la partie transports en rationalisant les flux et échanges de matières entre les sites. Cependant, le coût global ne diminue pas dû aux coûts de production et de stockage en France plus élevés qu'au Maroc. Les coûts de production ne sont pas optimisés car les objectifs de production ciblaient la polyvalence des équipements et l'autonomie des différents sites. Malgré une importante capacité de production à Troyes, Petit Bateau ne peut le faire avec les organisations et process en place.

L'enjeu de ce projet était de promouvoir un tricotage français. Cependant, l'image de Petit Bateau auprès de ses clients est d'être une entreprise française qui produit en France. Revendiquer un tricotage France et non un produit "Made in France", brouille le message consommateur qui va alors comprendre que toute la chaîne de production n'est pas 100% française.

Une autre raison qui n'a pas mené à l'aboutissement de ce projet, est la mise en place d'un autre projet. Ce nouveau projet consiste à intégrer en France, l'opération d'impression. Cette opération qui consiste à imprimer d'un motif les tissus, est intégrée dans l'usine marocaine. Cependant, elle est sous-traitée en France ce qui augmente de manière significative les coûts. Intégrer ce processus dans le flux de l'usine française, réduirait considérablement le coût de ses produits et donc rebattrait les cartes des résultats obtenus dans cette étude. A l'avenir, l'étude pourra être reprise en considérant l'opération d'impression en interne en France et en cherchant à promouvoir un 100% "Made in France" sur les produits les plus intéressants.

2.5 Conclusion

Cette problématique posée par la réalité rencontrée dans l'entreprise Petit Bateau est un problème d'allocation dynamique de produits dans le contexte d'une chaîne logistique. Il s'agit d'une décision d'un niveau important située sur l'axe stratégique. Le processus de production est composé de plusieurs opérations et pour chacune, plusieurs usines sont capables de les réaliser dans des sites différents. La décision à prendre consiste à déterminer quelle quantité de chaque catégorie sera fabriquée sur chaque site. L'objectif est de minimiser les coûts de la chaîne logistique (stockage, transport et production).

Le modèle proposé a été testé sur différentes instances de la littérature ([Panicker et al. \(2013\)](#)). Les résultats obtenus par cet auteur ont été égaux voire améliorés selon les instances. Dans un second temps, le modèle a été utilisé sur le cas industriel de l'entreprise. Une réduction importante des coûts de transport a pu être proposée en utilisant le modèle mathématique. L'amélioration du coût de transport est de 37% en comparaison à la situation initiale. L'étude ouvre pour l'entreprise la possibilité d'utiliser un outil d'aide à la décision pour prendre des décisions d'ordre stratégique sur l'affectation des produits aux différents sites de production à chaque lancement de collection (tous les six mois).

Pour aller plus loin, le modèle pourrait être utilisé sur un objectif de maximisation du profit plutôt que de minimiser un coût. Dans ce sens, une variable de décision sur le prix de vente peut être proposée selon le flux de production choisi. Par exemple, les produits 100% fabriqués en France peuvent être vendus à un prix plus élevé. D'autre part, le nombre de ventes peut également varier en fonction du lieu de production aux différentes étapes. Le fabriqué en France peut être plus attractif pour les consommateurs et donc considérer une demande variable.

Chapitre 3

Problème d'agencement

Sommaire

3.1	Contexte	54
3.2	Description du problème	55
3.3	État de l'art	57
3.4	Modèle mathématique	64
3.5	Algorithme génétique	68
3.6	Campagnes de tests numériques	73
3.7	Conclusion	78

Résumé

Ce chapitre traite d'un problème qui consiste à organiser l'implantation des machines de l'atelier de tricotage de l'entreprise. Des groupes de machines sont créés de façon à équilibrer la charge de travail entre les opérateurs et les machines sont positionnées par groupe dans l'espace. Un nouveau modèle est proposé avec deux approches de résolution. La première approche consiste à résoudre le problème de manière agrégée. La seconde à le résoudre en deux temps de manière séquentielle. Les deux approches ont été testées sur CPLEX-ILOG et comparées. Pour résoudre le problème en conditions réelles, un algorithme génétique a été développé. Les freins à la mise en place pratique de cette solution sont présentés ainsi que des pistes pour approfondir ce sujet à la fin de ce chapitre.

Publications

A. Berthier, A. Yalaoui, H. Chehade, F. Yalaoui, L. Amodeo, G. Coquelet, Machines group and load balancing : an industrial case, IFAC-PapersOnLine 52 (2019) 415–420

3.1 Contexte

Pour aborder le problème traité dans ce chapitre, nous donnons quelques éléments de contexte concernant l'atelier de tricotage. Parmi les trois étapes de production qui constituent le processus de fabrication de Petit Bateau, ce chapitre est consacré à l'atelier de tricotage (première étape du process). Chaque jour, les 15 employés qui y travaillent créent des rouleaux de matière. Cette quantité de tissu nécessite une présence continue sur les 50 machines du bâtiment, atelier où les trois-huit sont encore en vigueur. Avant d'être travaillé, le fil est acheté à des fournisseurs turcs ou européens, puis contrôlé afin de vérifier sa résistance et sa largeur. Une fois homologué, il est placé sous forme de bobines dans d'immenses armoires transparentes (figure 3.1), triées par couleur, pour éviter les "volards", ces mini-chutes de fils volatiles qui contaminent les rouleaux entre eux.



FIGURE 3.1 – Les bobines de fils sont rangées dans des armoires transparentes

Si les 50 machines de l'atelier ne tournent jamais toutes en même temps – certaines sont réservées au tricotage pour les pièces d'hiver, d'autres pour celles d'été –, elles ont pour point commun un perfectionnement technologique continu. Grâce à elles, Petit Bateau intègre des motifs à ses tissus, ou tricote en double face, un versant et l'autre du tissu en même temps, gagnant ainsi un temps précieux et réduisant au passage sa consommation d'énergie. Ces machines rotatives qui font fonctionner jusqu'à 3 000 aiguilles (Figure 3.2) et 72 bobines en simultanée

tricotent en tout 1 140 tonnes de mailles par an. Ces machines sont déplaçables à condition de les démonter et de les remonter. Cela représente une charge de travail de 48h pour 2 personnes à temps plein.

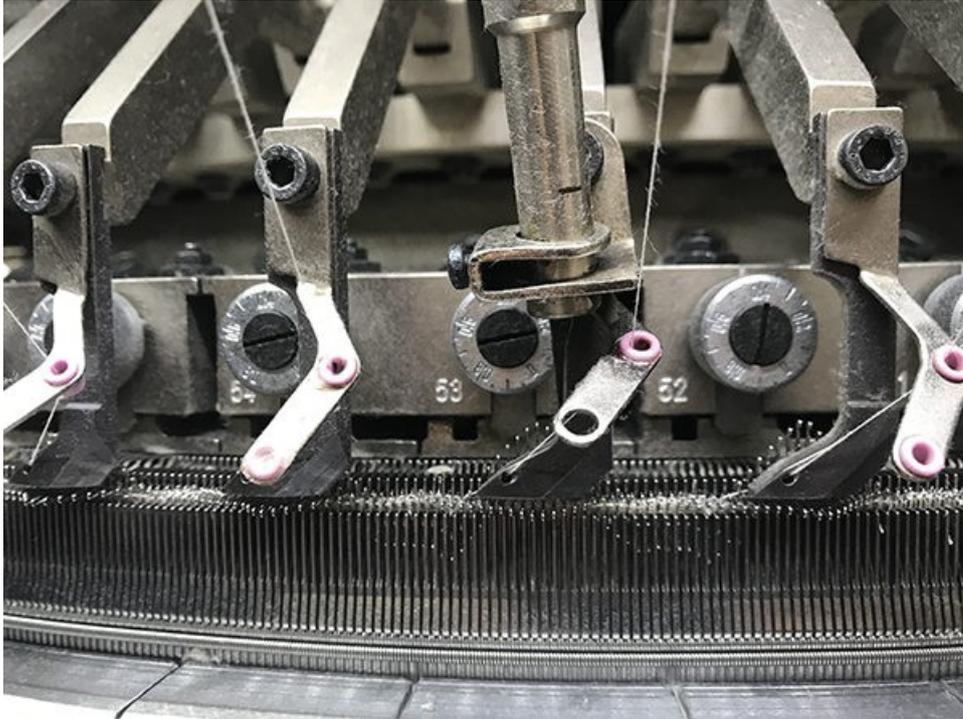


FIGURE 3.2 – Les machines rotatives tricotent grâce à leurs quelques 3 000 aiguilles

C'est à Troyes que l'équipe créative effectue ses développements de matières. Un premier rouleau test y est produit, pour la réalisation de plusieurs pièces. Une fois que le tissu est validé, un lot industriel, soit entre 114 et 228 kilos, est à nouveau mis à l'épreuve. Puis, installé sur un grand chariot, il traverse le bâtiment en direction de la teinture, située juste en face. Là, 40 personnes vont lui donner sa couleur définitive et le stabiliser pour garantir sa qualité et durabilité. C'est dans l'usine originelle que cet atelier est situé, un bâtiment qui porte le nom de Saint Joseph (section 1.3.5).

3.2 Description du problème

L'atelier de tricotage est composé de M machines disposées dans un atelier de P emplacements. L'atelier est composé uniquement de métiers à tricoter de type circulaire. Le processus de tricotage est composé d'une opération unique sur machine. Toutes les machines ne sont pas capables de réaliser tous les produits. Il y

a quelques années, toutes les machines tournaient en simultané sans s'arrêter. Désormais, seulement un certain nombre de machines peuvent tourner en simultané. Cela est dû à la réduction d'effectif qu'a connu l'atelier. Le nombre de machines par opérateur est limité et donc le nombre de machines pouvant tourner dépend du nombre d'opérateurs présents. Une rotation entre les machines doit donc être établie pour garantir l'ensemble de la production pour une collection et répondre à la demande du marché. Le processus prévoit qu'une machine doit être conduite, c'est-à-dire gérée par un opérateur et chaque opérateur a un ensemble de machines à conduire en même temps. Dans le cas de Petit Bateau, le nombre de machines est limité à cinq par opérateur mais dépend de son niveau de qualification. Pour plus d'efficacité, les machines affectées à un opérateur doivent être proches pour éviter des déplacements à l'opérateur et assurer une meilleure réactivité. Le problème présenté ici consiste à trouver le meilleur agencement de l'atelier pour satisfaire la demande et optimiser le travail des opérateurs.

L'agencement initial des machines réparties sur 4 groupes est donné par la figure 3.3. Plusieurs remarques sont à faire sur cette organisation :

- Les opérateurs sont au nombre de 5 alors qu'il y a seulement 4 groupes
- Les machines d'un même groupe peuvent être séparées par un mur (barre noire) ce qui limite le niveau de surveillance des opérateurs

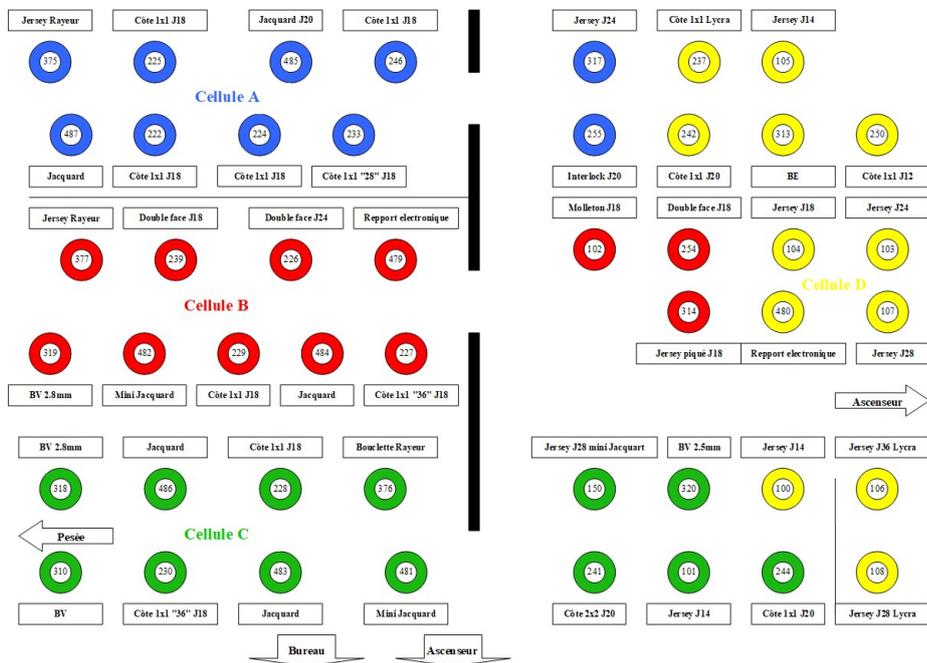


FIGURE 3.3 – Agencement initial des machines réparties en 4 groupes

De plus, chaque machine a une charge de production à réaliser. L'objectif consiste à créer des groupes de machines qui s'adaptent aux caractéristiques de la production de la saison considérée de telle sorte qu'ils soient chacun affecté à un opérateur de façon à équilibrer la charge de travail entre les opérateurs. Les données suivantes sont connues :

- K : nombre de machines
- T_k : charge de production de chaque machine k ($k = 1 \dots K$)
- B : nombre de groupes à créer
- N : nombre maximum de machines par groupe

Le second objectif est de grouper dans l'atelier les machines d'un même groupe. Chaque machine doit être affectée à une position dans l'atelier de manière à former les groupes. Le plan de l'atelier a été quadrillé pour former des emplacements auxquelles les machines pourront être affectées. La figure 3.4 montre le quadrillage de l'atelier tel que qu'il a été utilisé dans la modélisation. Toutes les cases blanches peuvent être utilisées par un métier. Les distances sont calculées par la mesure Euclidienne. Voici les données pour cette partie du problème :

- P : nombre d'emplacements
- C_p : Coordonnée sur l'axe x pour l'emplacement p
- L_p : Coordonnée sur l'axe y pour l'emplacement p
- D_{ad} : Matrice des distances entre 2 emplacements a ($a = 1 \dots P$) et d ($d = 1 \dots P$)

Suite à la description du problème traité, un état de l'art sur les problèmes similaires est présenté dans la section suivante. Celle-ci regroupe plusieurs catégories de problème proches du problème de Petit Bateau.

3.3 État de l'art

Le problème étudié est une combinaison de différents problèmes de la littérature :

- Facility Layout Problem (FLP)
- Group Technology (GT)
- Assembly Line Balancing Problem (ALBP)
- Worker Assignment Problem

Le tableau 3.1 présente un résumé de l'état de l'art pour positionner le problème par rapport à la littérature existante détaillé dans ce chapitre.

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22
23	24	25	26	27	28	29	30	31	32	33
34	35	36	37	38	39	40	41	42	43	44
45	46	47	48	49	50	51	52	53	54	55
56	57	58	59	60	61	62	63	64	65	Entrée 66
Passée 67	68	69	70	71	72	73	74	75	76	77
Sortie 78	79	80	81	82	83	84	85	86	87	88
89	90	91	Entrée		94	95	96	97	98	99

FIGURE 3.4 – Quadrillage de l'atelier de tricotage

	Caractéristiques						Objectifs		
	DW	CL	GM	GP	RR	AL	TC	D	LB
Notre problème	x	x	x		x			x	x
Facility Layout Problem (FLP)	x	x					x	x	
Group Technology (GT)			x	x			x	x	
Cellular Manufacturing (CM)		x	x	x			x		
Worker Assignment					x				
Assemblt Line Balancing Problem (ALBP)						x			x

DW : Designing Workshop ; CL : Cellular Layout ; GM : Group Machines ; GP : Group Parts ; RR : Resource Restriction ; AL : Assembly Line ; TC : Total Costs ; D : Distances ; LB : Load Balancing

TABLEAU 3.1 – Positionnement du problème d'agencement

3.3.1 Facility layout problem

Ce problème est avant tout un problème FLP avec pour objectif d'agencer les machines d'un atelier de travail. FLP est une catégorie importante des problèmes de recherche opérationnelle qui sont étudiés depuis de nombreuses années. FLP consiste à trouver l'agencement optimal d'un nombre donné de machines non superposables dans un espace défini (Anjos et Vieira (2017)). Plusieurs définitions sont données dans la littérature (Drira *et al.* (2007)). La première a été donnée par Koopmans et Beckmann (1957) qui définit ces problèmes comme des problèmes communs de l'industrie dont l'objectif est de configurer une installation physique en minimisant les coûts de transport de matériels entre chaque poste. Une définition générale est donnée plus tard par Heragu et Kakuturi (1997) : un FLP est un agencement de tout ce qui est nécessaire pour la production de biens ou la prestation de services. Cela doit amener à la meilleure performance de chaque tâche. La zone à aménager peut être un centre de travail, une cellule de fabrication, un atelier d'usinage, un département, un entrepôt, etc.

Plusieurs objectifs peuvent être étudiés pour cette catégorie de problème. L'objectif peut être de minimiser des distances (Meller *et al.* (1998)), de déterminer les emplacements et la répartition de l'espace disponible entre un nombre donné d'installations (Azadivar et Wang (2000)), pour minimiser le coût total de manutention (Lee et Lee (2002)) ou encore de maximiser l'efficacité en tenant compte des diverses interactions entre les installations et les systèmes de manutention lors de la conception des aménagements (Shayan et Chittilappilly (2004)).

Drira *et al.* (2007) a proposé un graphique de classification des problèmes FLP (figure 3.5). Selon cette classification, le problème étudié dans ce chapitre est un problème d'agencement de cellule (cellular layout problem). Comme les machines peuvent être de tailles différentes, l'objectif final est de créer des groupes avec des contours de dimensions variables. Dans un premier temps, cette contrainte de taille irrégulière ne va pas être considérée. Ainsi, chaque emplacement peut contenir n'importe quelle machine peut importe sa taille.

3.3.2 Group Technology Problem

Le problème de ce chapitre peut également être considéré comme un problème de GT. Le concept de GT a été introduit par Mitrofanov (1983) qui est aujourd'hui considéré comme le "père" de ce domaine. GT est un type de classification d'agencement (Hassan (1995)) de même qu'un agencement job shop, flow shop ou encore un fixed layout. Il est défini comme un mouvement de fabrication identifiant des pièces similaires et les regroupant en familles pour tirer parti de leurs similitudes dans la fabrication et la conception (Selim *et al.* (1998)). Dekkers (2018) a plus récemment étudié les GT du point de vue de la conception d'organisation.

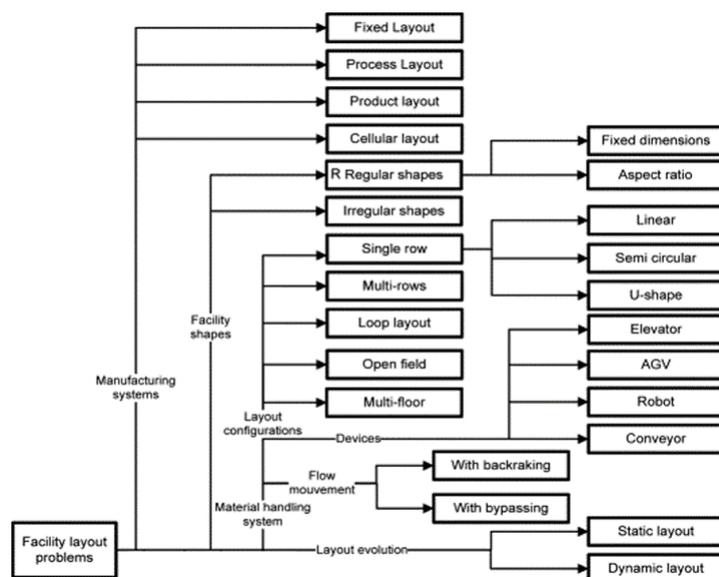


FIGURE 3.5 – Classification des problèmes FLP *Drira et al.* (2007)

Comme il est combiné avec un FLP, le problème de ce chapitre est proche d'un problème de Cellular Manufacturing (CM). CM a été introduit pour la première fois par *Kusiak (1987)*. *Papaioannou et Wilson (2010)* ont expliqué que les CM sont une application des GT et émergent comme une alternative prometteuse de nouveaux systèmes de production. CM permet la création et l'exploitation de cellules de production. Les produits sont groupés par famille et les machines par cellule. L'objectif est de réduire les temps de changement et le temps de présence des produits dans le système : cela tout en réduisant les stocks et en garantissant les délais de production (*Wemmerlöv et Hyer (1989)*).

De façon générale, résoudre un CM problème consiste à suivre ces trois étapes :

- Créer des familles de produits selon leurs contraintes process
- Grouper les machines en cellule
- Affecter les groupes de produits aux cellules de machines

Ces trois étapes ne sont pas nécessairement réalisées dans cet ordre ou même de façon séquentielle. Dans le problème considéré ici, les opérateurs et les machines sont les attributs considérés. Cependant dans la littérature, ce sont les combinaisons produits-machines qui sont les plus considérées. *Selim et al. (1998)* a présenté trois stratégies possibles :

- Formation des familles de produits puis les machines sont groupées en cellules. Ces cellules sont basées sur les caractéristiques des familles de produits. Cette stratégie est référencée comme Part-Family Identification (PFI)

- Création des cellules de machines basée sur les similarités des gammes de production. Les produits sont ensuite affectés aux cellules. Il s'agit de la stratégie Machine Groups Identification (MGI)
- Formation simultanée des familles de produits et des cellules de machines. C'est la stratégie Part Families/Machines Grouping (PF/MG).

Finalement, le problème peut également être relié aux systèmes de production dit reconfigurables ([Bortolini et al. \(2018\)](#)). En effet, la configuration de l'atelier pourrait être revue régulièrement en fonction de la nouvelle demande du marché et donc de la nouvelle collection à produire.

3.3.3 Assembly Line Balancing Problem

Le problème étudié porte également sur un équilibrage de charge. Cette notion n'est pas présente dans les problèmes de CM décrits dans la littérature. C'est pourquoi, nous nous sommes également intéressés aux problèmes d'équilibrage de ligne d'assemblage (ALBP).

[Battaïa et Dolgui \(2013\)](#) ont publié une classification de ce type de problème sans se limiter à la configuration de la ligne d'assemblage. Ils concluent que les systèmes qui ne sont pas des lignes d'assemblage sont peu traités dans la littérature. Mais le concept d'ALBP peut être appliqué à des configurations de lignes indépendantes ou parallèles. Nous allons donc considérer le cas général de ce type de problème et l'appliquer à notre système spécifique.

L'équilibrage de ligne consiste à affecter un ensemble d'opérations (pour obtenir le produit fini) à des postes d'assemblage positionnés en ligne selon l'ordre des opérations ([Dolgui et Proth \(2013\)](#)). [Boysen et al. \(2007\)](#) ont proposé un schéma de classification pour les ALBP. Ils ont introduit une notation sous la célèbre forme $[\alpha/\beta/\gamma]$ donnée initialement pour l'ordonnancement ([Graham et al. \(1979\)](#)) mais adapté ici. La première composante représente la caractéristique de précédence du graph ; la seconde, les caractéristiques des postes et de la ligne et la dernière, l'objectif pris en compte.

Les ALPBP sont divisés en deux principaux sous-problèmes : Simple Assembly Line Balancing Problem (SALBP) et Generalized Assembly Line Balancing Problem (GALBP).

SALPB ont plusieurs caractéristiques ([Baybars \(1986\)](#), [Scholl \(1999\)](#)) qui sont :

- Production de masse d'un unique produit
- Process de production donné
- Ligne soumise à un temps de cycle fixe et régulier c
- Temps d'opération déterminé t_j
- Pas de restriction d'affectation autre que les contraintes de précédence

- Agencement en série avec m postes
- Tous les postes sont équipés à l'identique (machines et opérateurs)
- Maximisation de la performance de la ligne par le temps total des tâches :
 $E = t_{sum}/(m * c)$, $t_{sum} = \sum_{j=1}^n t_j$

Scholl et Becker (2006) ont expliqué que plusieurs versions du problème découlent de la variation de l'objectif comme illustré dans le tableau 3.2. SALPB-F est un problème de faisabilité qui consiste à établir s'il existe ou non une ligne équilibrée à partir de la combinaison des données m et c . SALPB-1 et SALPB-2 ont une double relation. Le premier minimise m avec c fixe et connu, pendant que le second minimise c (maximisation de la productivité) avec un m donné. Le problème SALPB-E est la version la plus générale. Il maximise l'efficacité de la ligne en minimisant m et c de manière simultanée et donc en considérant leurs interactions.

Ces quatre versions sont également utilisées pour décrire les méthodes de résolution de problèmes plus complexes comme ceux regroupés sous le terme GALBP. Par exemple, il est possible de trouver dans la littérature d'autres caractéristiques telles que celles ci-dessous (Becker et Scholl (2006)) :

- Objectif orienté coût et profit
- Sélection d'équipement et proposition de processus alternatif. Il s'agit dans la littérature des problèmes d'Assembly Line Design Problem (ALDP)
- Tâches et postes d'opération positionnés en parallèles (et non en ligne)
- Agencement de la ligne en forme de U : U-line Assembly Line Balancing Problem (UALBP)
- Restriction d'affectation
- Temps d'opération stochastiques
- Ligne non mono-produit

		Temps de cycle c	
		Donné	Minimisation
Nombre m de postes	Donné	SALPB-F	SALPB-2
	Minimisation	SALPB-1	SALPB-E

TABLEAU 3.2 – Quatre version des SALPB Scholl et Becker (2006)

Il a été montré par [Ouazene et al. \(2014\)](#) que l'objectif a considéré le plus efficace dans le cas d'un équilibrage de charge est la minimisation de la différence entre la charge maximale et la charge minimale. Cette fonction obtient un meilleur résultat d'équilibrage que simplement minimiser le maximum. C'est pourquoi nous avons repris cette fonction objectif dans les travaux de ce chapitre.

3.3.4 Worker Assignment Problem

Pour conclure l'état de l'art de ce chapitre, les problèmes d'affectation aux opérateurs ont été parcourus. Le problème de ce chapitre, doit traiter d'un problème de ressources opérateurs. Chaque groupe de machines formé va être affecté à un opérateur dans la réalité de l'atelier. C'est pourquoi, il est intéressant de regarder dans la littérature comment est traité ce type de problème même si nous ne le traitons pas de manière directe. Il s'agit d'un sujet d'intérêt de longue date dans le domaine de l'optimisation combinatoire ([Pentico \(2007\)](#)). Cependant, la littérature relative à l'effet organisationnel du système sur ses performances dans le cadre du problème d'affectation des travailleurs n'est pas abondante. En particulier, dans une configuration CM ([Méndez-Vázquez et Nembhard \(2018\)](#)).

D'autres études ont été menées pour combiner ALBP et worker assignment problem. [Dolgui et al. \(2018\)](#) ont étudié l'affectation optimale de la main d'œuvre aux opérations d'une chaîne de montage synchronisée. Les travailleurs peuvent se déplacer sur les stations pour adapter les capacités des postes de travail aux charges de travail. Récemment, des travaux sur l'optimisation du nombre d'opérateurs sur une ligne d'assemblage ont été publiés ([Delorme et al. \(2019\)](#)).

Pour résumer, cet état de l'art montre que la recherche a porté beaucoup d'intérêt aux problèmes FLP, GT et ALBP. Cependant, à notre connaissance, il n'y a pas eu de publications les combinant dans l'objectif de répondre à une problématique d'agencement avec équilibrage de charge entre des groupes de production. Une première approche de résolution à l'aide d'un modèle mathématique se trouve dans la section suivante.

3.4 Modèle mathématique

Un nouveau modèle pour résoudre ce problème spécifique a été proposé au cours de ce travail.

Deux approches différentes ont été testées. La première est un modèle agrégé qui regroupe les machines et les assigne à des emplacements simultanément. La seconde est une résolution séquentielle en deux étapes :

- Première étape : création de groupes de machines de charges équilibrées
- Deuxième étape : les groupes de machines sont affectés aux emplacements de l'atelier de production

3.4.1 Notations

- M : nombre de machines
- T_m : charge de la machine m ($m = 1...M$)
- B : nombre de groupes à créer
- N : nombre maximum de machines par groupe
- P : nombre d'emplacements dans l'atelier
- C_p : coordonnée de l'axe x
- L_p : coordonnée de l'axe y
- D_{ad} : Matrice des distances entre deux emplacements a ($a = 1...P$) et d ($d = 1...P$)

3.4.2 Modèle agrégé

Un modèle agrégé (M_a) est proposé pour résoudre simultanément la création de groupes de charges équilibrées et l'affectation des machines aux emplacements de l'atelier.

Variables de décision :

$$g_{mb} = \begin{cases} 1 & \text{si la machine } m \text{ est affectée au groupe } b \\ 0 & \text{sinon} \end{cases}$$
$$x_{mp} = \begin{cases} 1 & \text{si la machine } m \text{ est affectée à l'emplacement } p \\ 0 & \text{sinon} \end{cases}$$

E_{max} : Charge maximum affectée à un même groupe

E_{min} : Charge minimum affectée à un même groupe

D : Distance maximale entre deux machines d'un même groupe

Fonction objectif :

$$\text{Minimiser } \alpha \cdot (E_{max} - E_{min}) + \beta \cdot D \quad (3.1)$$

Avec $\alpha = \frac{1}{(\sum_{m=1}^M T_m)/B}$ and $\beta = \frac{1}{Max(D_{ad})}$

La fonction objectif définit un objectif double : minimiser l'écart de charges entre le groupe avec la charge la plus importante et le groupe avec celle minimum et minimiser la distance maximum qui sépare deux machines affectées à un même groupe. Pour que les deux objectifs aient la même valeur dans l'optimisation, ils sont normalisés par les facteurs α et β .

Contraintes :

$$\sum_{p=1}^P x_{mp} = 1; \forall m = 1 \dots M \quad (3.2)$$

$$\sum_{m=1}^M x_{mp} \leq 1; \forall p = 1 \dots P \quad (3.3)$$

$$\sum_{b=1}^B g_{mb} = 1; \forall m = 1 \dots M \quad (3.4)$$

$$\sum_{m=1}^M g_{mb} \leq N; \forall b = 1 \dots B \quad (3.5)$$

$$\sum_{m=1}^M g_{mb} \cdot T_m \leq E_{max}; \forall b = 1 \dots B \quad (3.6)$$

$$\sum_{m=1}^M g_{mb} \cdot T_m \geq E_{min}; \forall b = 1 \dots B \quad (3.7)$$

$$D_{ad} \cdot x_{ia} \cdot x_{jd} \cdot g_{ib} \cdot g_{jb} \leq D; \quad (3.8)$$

$$\forall i, j = 1 \dots M, a, d = 1 \dots P, b = 1 \dots B; i \neq j; a \neq d$$

La contrainte (3.2) stipule qu'il y a exactement une place p pour chaque machine m . La contrainte (3.3) traduit qu'il n'y a pas plus d'une machine m à chaque place p . La contrainte (3.4) établit qu'il y a exactement un groupe b pour chaque machine m . La cinquième contrainte exprime qu'il n'y a pas plus de N machines pour chaque groupe b . La contrainte (3.6) traduit le fait qu'il n'y ait pas plus de charge que E_{max} pour chaque groupe b . La contrainte (3.7) garantit qu'il n'y ait pas de charge inférieure à E_{min} pour chaque groupe b . La dernière contrainte (3.8) stipule qu'il n'y ait pas de distance supérieure à D entre deux machines d'un même groupe b .

La contrainte (3.8) n'est pas linéaire, une linéarisation est donc proposée ci-dessous :

$$D_{ad} \cdot (x_{ia} + x_{jd}) \leq \frac{D}{2} + (4 - g_{ib} - g_{jb} - x_{ia} - x_{jd}) \cdot M; \quad (3.9)$$

$$\forall i, j = 1 \dots M, a, d = 1 \dots P, b = 1 \dots B; i \neq j; a \neq d$$

3.4.3 Modèle séquentiel

Le modèle séquentiel (M_s) permet de résoudre le même problème en deux étapes séquentielles :

- Première étape : création de groupes de machines de charges équilibrées
- Deuxième étape : les groupes de machines sont affectés aux emplacements de l'atelier

Partie 1 : Création des groupes

Variables de décision :

$$g_{mb} = \begin{cases} 1 & \text{si la machine } m \text{ est affectée au groupe } b \\ 0 & \text{sinon} \end{cases}$$

E_{max} : Charge maximum affectée à un même groupe

E_{min} : Charge minimum affectée à un même groupe

Fonction objectif :

$$\text{Minimiser } (E_{max} - E_{min}) \quad (3.10)$$

Contraintes :

$$\sum_{b=1}^B g_{mb} = 1; \forall m \quad (3.11)$$

$$\sum_{m=1}^M g_{mb} \leq N; \forall b \quad (3.12)$$

$$\sum_{m=1}^M g_{mb} \cdot T_m \leq E_{max}; \forall b \quad (3.13)$$

$$\sum_{m=1}^M g_{mb} \cdot T_m \geq E_{min}; \forall b \quad (3.14)$$

La contrainte (3.11) établit qu'il y a exactement un groupe b pour chaque machine m . La contrainte (3.12) stipule qu'il n'y a pas plus de N machines pour chaque groupe b . La contrainte (3.13) exprime que la charge maximum pour chaque groupe b est E_{max} . La dernière contrainte (3.14) indique qu'il n'y a pas de charge inférieure à E_{min} pour chaque groupe b .

Partie 2 : Affectation des machines aux emplacements

Selon cette modélisation, une nouvelle matrice de données d'entrée G_{mb} est introduite à partir du résultat de l'étape précédente. Il s'agit de la matrice d'affectation de la machine m au groupe b .

Variables de décision :

$$x_{mp} = \begin{cases} 1 & \text{si la machine } m \text{ est affectée à l'emplacement } p \\ 0 & \text{sinon} \end{cases}$$

D : Distance maximale entre deux machines d'un même groupe

Fonction objectif :

$$\text{Minimiser } D \tag{3.15}$$

Contraintes :

$$\sum_{p=1}^P x_{mp} = 1; \forall m = 1 \dots M \tag{3.16}$$

$$\sum_{m=1}^M x_{mp} \leq 1; \forall p = 1 \dots P \tag{3.17}$$

$$D_{ad} \cdot (x_{ia} + x_{jd}) \leq \frac{D}{2} + (4 - g_{ib} - g_{jb} - x_{ia} - x_{jd}) \cdot M; \tag{3.18}$$

$\forall i, j = 1 \dots M, a, d = 1 \dots P, b = 1 \dots B; i \neq j; a \neq d$

La contrainte (3.16) est qu'il y a exactement une place p pour chaque machine m . La contrainte (3.17) est qu'il n'y a pas plus d'une machine m à chaque place p . La contrainte finale (3.18) est que la distance maximale entre deux machines d'un même groupe b est D .

Le problème étant NP-difficile, le modèle mathématique ne permettra pas de résoudre des instances de grande taille telles que celles de Petit Bateau car les temps de calcul sont rapidement très importants. Une autre méthode de résolution approchée a donc été développée sur ce problème. Le choix a été fait d'utiliser un algorithme génétique (AG), métaheuristique très répandue dans la littérature et pouvant obtenir rapidement des résultats à présenter à Petit Bateau pour leurs prises de décision.

3.5 Algorithme génétique

3.5.1 Principe général

Afin de pouvoir mettre en place une solution qui puisse être utilisée dans l'atelier de tricotage par le responsable de l'atelier, une méthode de résolution approchée a été développée. L'approche de résolution la plus courante dans la littérature pour ce type de problème est l'algorithme génétique (AG).

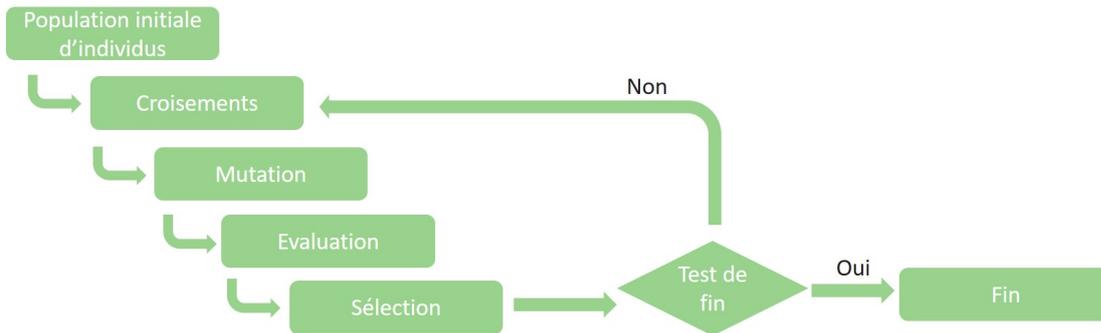


FIGURE 3.6 – Schéma d'itérations des étapes de l'algorithme génétique

Les AG sont des méthodes d'optimisation inspirées de la biologie (Holland *et al.* (1992)) qui sont largement utilisées pour résoudre les problèmes d'ordonnement (Goldberg (2006)). Ce type d'algorithme est appelé algorithme itératif car les mêmes étapes sont répétées plusieurs fois jusqu'à atteindre un critère d'arrêt. Le schéma 3.6 montre l'enchaînement de ces étapes. En général, les données de l'AG sont un ensemble de solutions appelées population d'individus qui seront évaluées. Une fois l'évaluation des individus effectuée, les parents sont sélectionnés et un mécanisme de croisement est appliqué pour obtenir une nouvelle génération d'individus. Le mécanisme de croisement offre la possibilité d'intensifier la recherche d'une solution vers un optimum. En outre, un schéma de mutation est également appliqué afin d'introduire une diversification dans la population. La difficulté de ce type d'algorithme est de parvenir à une intensification rapide avec une diversification suffisante pour éviter de tomber dans un optimum local en se rapprochant de la meilleure solution globale. Le fonctionnement de l'algorithme génétique est donné par l'algorithme 1. Les spécifications propres à l'algorithme développé pour répondre au problème d'agencement de Petit Bateau sont expliquées dans cette section.

3.5.2 Représentation de la solution

La solution est représentée sous la forme d'un chromosome. Pour ce problème, nous avons choisi d'utiliser un chromosome représenté sous la forme d'une table de 2 lignes et d'autant de colonnes que d'emplacements P dans l'atelier. Sur la première ligne, il est affecté à chaque emplacement une machine et sur la seconde ligne, un groupe. Chaque machine est affectée une seule fois alors qu'un même groupe peut être affecté à plusieurs emplacements.

Algorithme 1 : Algorithme génétique

```
1: Initialisation de la population
2: Évaluation des individus
3: Initialisation de  $S_0$  meilleure solution de la génération
4: Initialisation de  $S_{best}$  meilleure solution connue
5: tant que Nombre de générations successives identiques < Nombre maximum
   de générations successives identiques faire
6:   tant que Taille de la population n'a pas doublé faire
7:     Sélection de 2 individus
8:     Génération d'un enfant par croisement  $S$ 
9:     si Une mutation s'applique avec une probabilité  $p$  alors
10:       Application d'une mutation à  $S$ 
11:     fin si
12:      $E(S)$  = Évaluation de l'enfant  $S$ 
13:     si  $E(S) < E(S_0)$  alors
14:       Mise à jour de  $S_0$ 
15:     fin si
16:   fin tant que
17:   Sélection de la nouvelle génération
18:   si  $E(S_0) < E(S_{best})$  alors
19:     Mise à jour de  $S_{best}$ 
20:   sinon
21:     Incrémentations du nombre de générations successives identiques
22:   fin si
23: fin tant que
```

Emplacement	1	2	3	...	6
Machine	2	3	6	...	1
Groupe	2	1	1	...	3

TABLEAU 3.3 – Représentation du chromosome utilisé dans le GA

3.5.3 Décodage

Pour décoder et évaluer chacune des solutions, les deux parties de la fonction objectif sont calculées. En fonction des groupes affectés aux emplacements et des machines, la distance maximale entre deux machines d'un groupe est déterminée ainsi que l'écart de charge le plus important entre les groupes. Le pseudo code de la procédure d'évaluation est donné par l'algorithme 2.

3.5.4 Initialisation de la population

La population est initialisée de manière aléatoire. Plusieurs individus sont générés pour constituer une population. A chaque emplacement (chaque colonne) de l'individu, est affecté aléatoirement, un numéro de machine. Celui-ci est généré de manière à ne jamais affecter deux fois la même machine. Pour cela, une variable est utilisée pour marquer les machines déjà affectées. Le tirage aléatoire ne s'effectue que sur les machines encore disponibles. Puis pour chacun est affecté un groupe, toujours de manière aléatoire (Algorithme 3). Chaque individu de la population initiale est ensuite évalué.

3.5.5 Sélection, opérateurs de croisement et de mutation, procédure de correction

Dans cet algorithme un seul opérateur de croisement est utilisé ainsi qu'un opérateur de mutation. Pour créer un nouvel individu, un croisement entre deux individus parents est utilisé et une mutation peut être appliquée. La sélection des individus parents est faite aléatoirement de manière uniforme pour chaque individu dans la population de la génération précédente. L'opérateur de croisement est un croisement en un point. Un point de croisement est choisi aléatoirement sur le chromosome. La partie du chromosome avant ce point est copiée de l'individu parent 1 tandis que la suite du chromosome est issue de l'individu parent 2. La mutation choisie est une mutation par permutation. Deux colonnes de l'individu vont être inversées soit sur la ligne correspondant à l'affectation des machines,

Algorithme 2 : Procédure d'évaluation - AG Agencement

- 1: **pour** chaque emplacement p du chromosome **faire**
 - 2: Lister pour chaque groupe, les indices du chromosome y appartenant
 - 3: Compter le nombre d'emplacement par groupe
 - 4: **fin pour**
 - 5: **pour** chaque groupe b **faire**
 - 6: **pour** chaque indice de chromosome appartenant au groupe **faire**
 - 7: Faire la somme de la charge de production correspondante E
 - 8: **fin pour**
 - 9: **pour** chaque indice de chromosome appartenant au groupe **faire**
 - 10: **pour** chaque indice de chromosome différent appartenant au groupe **faire**
 - 11: **si** la distance entre les deux emplacements du groupe est supérieur à la plus grande distance entre deux emplacements connus d'un groupe **alors**
 - 12: Enregistrer cette distance comme la plus grande connue au sein du groupe D
 - 13: **fin si**
 - 14: **fin pour**
 - 15: **fin pour**
 - 16: **fin pour**
 - 17: Calcul de l'écart de charge entre les groupes : $Charge = \max(E) - \min(E)$
 - 18: Calcul de la plus grande distance entre deux emplacements appartenant à un même groupe : $Distance = \max(D)$
 - 19: Calcul de la fonction objectif : $Charge + Distance$
-

Algorithme 3 : Procédure d'initialisation - AG Agencement

- 1: **pour** chaque emplacement **faire**
 - 2: Affecter une machine aléatoire non encore assignée
 - 3: Affecter un groupe aléatoire qui n'a pas atteint le nombre maximum d'affectation
 - 4: **fin pour**
-

soit sur celle des groupes. Le nouvel individu généré doit subir une procédure de correction pour éviter toute infaisabilité suite à sa création (doublon d'affectation machine, dépassement du nombre maximum de machine par groupe...).

3.5.6 Procédure de génération

La nouvelle population ainsi créée est constituée de la génération précédente et de tous les individus enfants créés. Les nouveaux individus sont générés jusqu'au doublement de la population. L'ensemble de ces individus (anciens et nouveaux) sont triés par ordre de performance par rapport à la valeur de leur évaluation. La génération suivante est constituée uniquement des individus les plus performants. Les autres sont supprimés.

L'algorithme s'arrête quand il y a eu convergence. Deux critères d'arrêt ont été mis en place :

- Un nombre maximal de générations a été atteint
- La meilleure solution n'évolue plus depuis un nombre fixé de générations

A l'issue de l'algorithme et quand l'un des deux critères d'arrêt s'applique, la meilleure solution trouvée au cours des générations est la solution conservée.

Pour évaluer la pertinence de l'utilisation de l'algorithme génétique de cette section mais également du modèle mathématique précédemment décrit, plusieurs tests ont été mis en place. Dans un premier temps sur des instances de petites tailles puis sur les instances réelles de l'entreprise Petit Bateau.

3.6 Campagnes de tests numériques

3.6.1 Tests théoriques

Un exemple a été testé pour les deux modèles avec des données réelles extraites d'une base de données industrielles caractérisées par : 20 machines ($M = 20$), 30 places ($P = 30$) et 7 groupes ($B = 7$) avec un nombre maximum de machines par groupe $N = 3$.

Le solveur CPLEX-ILOG a été utilisé pour tester les deux approches du modèle mathématique et les résultats ont été comparés. Les résultats ont également été comparés avec ceux de l'algorithme génétique pour valider son utilisation pour résoudre les instances réelles qui ne sont pas solvables par l'utilisation d'un solveur dans les durées d'exécution acceptables.

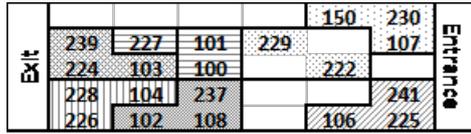


FIGURE 3.7 – Agencement à partir du modèle agrégé

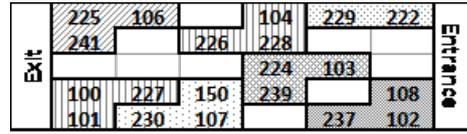


FIGURE 3.8 – Agencement à partir du modèle séquentiel

Équilibrage de la charge des groupes

Avec les deux modèles, la même répartition de la charge est trouvée pour équilibrer les charges entre les groupes lors de leur création. $E_{max} = 6898$ et $E_{min} = 6829$

Par conséquent, la fonction objectif est égale à

$$E_{max} - E_{min} = 69$$

Implantations

Comme pour l'équilibrage des charges, les deux modèles trouvent la même valeur de fonction objectif pour la solution d'aménagement de l'atelier. Cependant, les deux modèles n'ont pas la même configuration. Cela s'explique par le fait que plusieurs solutions sont possibles pour un même résultat de fonction objectif. Les propositions d'agencement physique sont représentées dans les figures 3.7 et 3.8. Chaque texture identifie un groupe créé.

Temps de traitement

Le modèle agrégé a tourné pendant plus de 4 heures pour trouver la solution donnée dans la figure 3.7. Alors que le modèle séquentiel a donné un résultat après 7 secondes d'exécution pour la partie de création des groupes et après 20 secondes pour la partie d'agencement de l'atelier.

Pour des résultats similaires, le modèle séquentiel est plus rapide et sera plus facile à utiliser pour les recherches futures.

L'algorithme génétique a été testé sur la même instance que pour la résolution des modèles mathématiques de manière optimale. L'algorithme trouve la même solution que le solveur sur cette instance.

Instances complémentaires

D'autres instances ont ensuite été mises en place pour confirmer les résultats obtenus sur la première étude. De manière similaire, les instances ont été construites à partir des données de production de Petit Bateau mais seulement une partie a été considérée pour être résolvable par le modèle. Le tableau 3.4 donne les caractéristiques des instances testées. Les tableaux 3.5 et 3.6 montrent que les mêmes valeurs objectifs sont obtenues avec le modèle agrégé et le modèle séquentiel. Comme cela avait été le cas sur la première instance testée, les temps de résolution sont considérablement inférieures avec la méthode séquentielle.

Instance	M	B	N	P
1	20	7	3	30
2	15	5	3	30
3	20	5	4	30
4	20	5	4	30
5	15	3	5	30

TABLEAU 3.4 – Caractéristiques des instances de petite taille

Instance	E_{max}	E_{min}	$\Delta E_{max} - E_{min}$	D	CPU (s)
1	12 895	12 635	260	6	12 600
2	10 220	7 335	2 885	6	18 900
3	14 255	14 214	41	6	12 600
4	10 719	10 627	92	6	9 000
5	15 759	15 748	11	8	19 800

TABLEAU 3.5 – Résultats du modèle agrégé sur les instances de petite taille

Instance	E_{max}	E_{min}	$\Delta E_{max} - E_{min}$	D	CPU (s)
1	12 895	12 635	260	6	30
2	10 220	7 335	2 885	6	21
3	14 255	14 214	41	6	31
4	10 719	10 627	92	6	28
5	15 759	15 748	11	8	29

TABLEAU 3.6 – Résultats du modèle séquentiel sur les instances de petite taille

3.6.2 Tests sur des instances Petit Bateau

L'étape suivante a été d'utiliser l'algorithme génétique développé pour résoudre l'instance réelle du problème :

- 44 machines
- 4 cellules de maximum 12 machines
- Charge machine annuelle 2017 (collections Printemps Été 2018 & Automne Hiver 2018)

La fonction objectif de la disposition de l'atelier actuel comprenant 4 cellules a été calculée :

- Différence de charge maximum entre deux cellules : 9 726 heures
- Distance maximum entre deux machines d'une même cellule : 8,06 unités

L'agencement des machines tel qu'il est dans l'atelier réel avec la répartition des 4 groupes est montré en figure 3.9. Chaque couleur représente un groupe. Le taux d'utilisation de chacune des machines est représenté par le volume des bulles. Plus la bulle est importante, plus la machine est utilisée.

Avec l'utilisation de l'algorithme sur les données réelles, la différence de charge entre les cellules est réduite à 24 heures ce qui représente un gain de 99%. La distance maximum entre deux machines d'une même cellule est quant à elle réduite à 7,07 unités (gain de 12%). Le gain sur l'agencement est limité par l'espace physique existant. La proposition du nouvel agencement est représenté en figure 3.10.

Dans l'atelier de tricotage, une équipe compte entre 5 et 6 opérateurs. Dans la logique d'affecter une cellule de machine à un opérateur, l'algorithme a été paramétré pour générer cinq cellules et non plus quatre. Le résultat de l'algorithme permet de créer des groupements de machines dont l'écart de charges maximum est égal à 10 heures et une distance maximum entre deux machines d'une même cellule de 5,1 unités. Ce nouvel agencement est illustré par la figure 3.11.

L'algorithme génétique a été utilisé pour analyser son comportement sur les données de production des dernières années. Pour l'année 2021, seulement les 6 premiers mois sont pris en compte. Les résultats sont donnés dans le tableau 3.7. La colonne Δ initial donne la différence $E_{max} - E_{min}$ initial et Δ AG après la résolution avec l'algorithme génétique. De la même façon, la distance maximal entre deux machines d'un même groupe D est donné par sa valeur initiale puis la valeur obtenue avec l'algorithme.

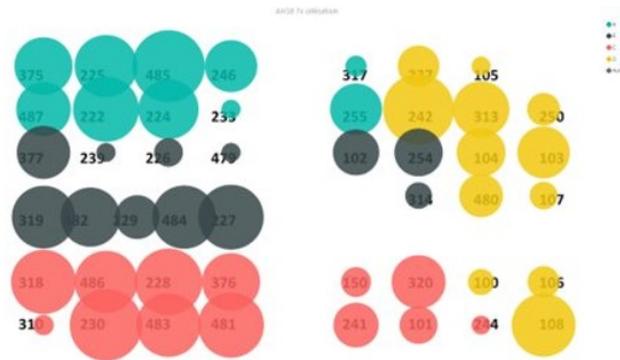


FIGURE 3.9 – Agencement initial des machines dans l'atelier avec représentation de leur taux d'utilisation

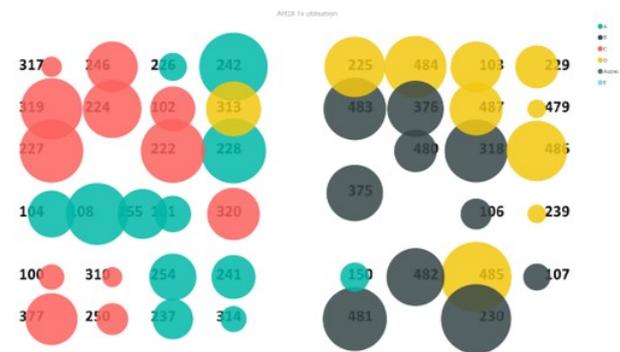


FIGURE 3.10 – Agencement après utilisation de l'AG pour créer et agencer 4 groupes de machines

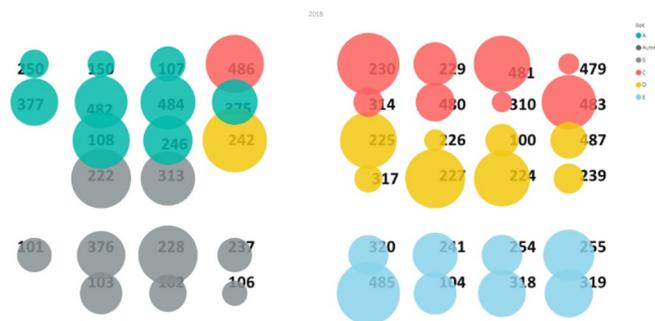


FIGURE 3.11 – Agencement après utilisation de l'AG pour créer et agencer 5 groupes de machines

Cet outil d'agencement pourra être utilisé par Petit Bateau pour trouver un agencement optimal de son atelier de tricotage à chaque lancement de nouvelle collection (2 fois par an) par exemple. Une prise en compte d'un coût de démé-

Année	M	B	N	P	Δ initial	D initial	Δ AG	D AG
2018	45	4	12	99	24 133	8,1	22	6,7
2018	45	5	9	99			25	5,1
2019	48	4	13	99	20 849	8,1	46	7,1
2019	48	5	10	99			53	6,7
2020	48	4	13	99	13 741	8,1	17	7,6
2020	48	5	10	99			19	5,8
2021	49	4	13	99	14 658	8,1	15	6,7
2021	49	5	10	99			17	5,1

TABLEAU 3.7 – Résultats AG données de production 2018 à 2021

nagement des métiers peut être ajouté pour limiter le nombre de déplacements de métier d'une collection à une autre. L'atelier de tricotage sera en mesure de fonctionner avec un agencement dynamique en fonction des volumes de production prévisionnels affectés aux métiers de l'atelier.

3.6.3 Mise en application

Cette étude d'agencement a permis de montrer que les performances de l'atelier de tricotage pouvaient être améliorée en pensant l'agencement de manière modulable en fonction des produits à faire. Cependant, cela n'a pas abouti dans la réalité du terrain pour le moment. En effet, bien que très intéressante, l'engagement nécessaire à mettre en place pour réaliser un tel changement d'atelier tous les 6 mois est très important. Démonter et remonter un métier correspond à une charge de travail de 48h pour 2 personnes à temps plein (sans arrêt). Il est donc difficilement envisageable de déplacer les 44 machines de l'atelier. Une idée qui pourrait être intéressante pour l'avenir, serait de positionner les métiers ainsi que les cantres (support pour mettre les bobines) sur des roulettes. Ainsi, les métiers pourraient être déplacés à convenance sans avoir à les démonter puis à les remonter.

3.7 Conclusion

Dans ce chapitre, l'optimisation de l'agencement de l'atelier de tricotage a été étudiée. L'atelier est composé de 49 machines avec des caractéristiques et des taux d'utilisation différents. L'objectif est double : créer des groupes de machines de charges équilibrées pour associer chaque groupe à un opérateur et les groupes physiquement dans l'atelier. Un nouveau modèle mathématique a été développé pour résoudre des instances de petites tailles. Deux approches différentes ont été testées, une approche de résolution agrégée pour optimiser les deux objectifs en simultanément

et une approche séquentielle qui dans un premier temps crée les groupes et dans un second propose une implantation. Les résultats obtenus montrent que l'approche séquentielle permet une résolution plus rapide du problème tout en atteignant une valeur de fonction objectif identique à l'approche agrégée. Pour résoudre les instances réelles avec un nombre de données plus important, un algorithme génétique a été développé. Cet algorithme a permis de proposer un agencement avec des groupes de machines d'un écart de charge maximum de 24h. Les perspectives sur cette étude sont de permettre à Petit Bateau d'intégrer l'utilisation de cet algorithme dans son processus de décision pour repenser l'atelier à chaque début de collection en fonction des besoins annoncés. La structure actuelle limite des performances. On peut les améliorer par la modification de l'agencement. Il a été décidé de disposer également d'un outil d'ordonnancement pour ensuite pouvoir évaluer l'impact de l'agencement sur les performances de l'ordonnancement. Sur la méthode de résolution utilisée, il serait pertinent de tester d'autres opérateurs de croisement et de mutation dédiés au problème, des opérateurs standards ont ici été utilisés. Les performances de l'algorithme pourrait ainsi être améliorés en temps de calcul et en convergence.

Chapitre 4

Optimisation de l'ordonnancement

Sommaire

4.1	Description du problème	82
4.2	État de l'art	83
4.3	Modèle mathématique	92
4.4	Algorithme génétique	98
4.5	Campagne de tests numériques - cas théoriques	107
4.6	Campagne de tests numériques - cas réels	112
4.7	Conclusion	118

Résumé

Le problème étudié dans ce chapitre porte sur un problème d'ordonnancement de machines parallèles non reliées avec des temps de changement dépendant des machines et de la séquence de production. Des contraintes d'éligibilité de machines et différentes ressources limitées sont prises en compte. Comme pour l'ensemble des problèmes traités dans cette thèse, ce sujet vient directement des problèmes rencontrés chez Petit Bateau. Les différentes caractéristiques de ce problème n'ont jamais été combinées ensemble. Deux méthodes de résolution sont proposées. Une première par résolution d'un modèle mathématique pour avoir une résolution exacte de ce problème complexe. La seconde est un algorithme génétique (GA) amélioré avec des opérateurs dédiés au problème. Cet algorithme permet de résoudre le problème sur les instances réelles de Petit Bateau.

Publications

A. Berthier, A. Yalaoui, H. Chehade, F. Yalaoui, L. Amodeo, C. Bouillot, Unrelated parallel machines scheduling with dependent setup times in textile industry, CIE (submitted) (2021).

A. Berthier, A. Yalaoui, H. Chehade, F. Yalaoui, L. Amodeo, C. Bouillot, Unrelated parallel machines scheduling with setup times in textile industry, Ola20 - Spain (2020).

4.1 Description du problème

L'objectif de cette partie du projet de thèse est d'être capable de fournir à l'entreprise un logiciel d'ordonnancement pour aider le responsable de l'atelier tricotage à prendre les décisions d'ordonnancement et d'organisation de l'atelier en prenant en considération les ressources disponibles. L'atelier est composé comme dans le chapitre précédent de M machines parallèles non reliées. Les machines sont groupées en W zones ou groupes. La notation z_{mw} est utilisée pour définir l'affectation de la machine m ($1 \dots M$) à la zone w ($1 \dots W$). L'organisation de l'atelier se base sur un roulement de 3 équipes de 5 opérateurs (matin, après-midi et nuit). Chaque opérateur est en charge des machines d'une zone. Le nombre de machines maximum qu'un opérateur peut faire tourner en simultané dans une zone w ($1 \dots W$) est donné par U_w . Ce nombre est défini pour chaque groupe w ($1 \dots W$), cependant il dépend de la qualification de l'opérateur affecté sur la zone w ($1 \dots W$). Il s'agit donc d'une valeur paramétrable qui caractérise une zone w ($1 \dots W$). Cela garantit le niveau de qualité de la production. L'opérateur est limité par son niveau de qualification. L'objectif est d'ordonnancer un nombre connu de N tâches sur les machines dans un horizon de temps H . L'horizon de temps H est composé de différentes périodes de temps t ($1 \dots H$). Les machines sont considérées non reliées car leur temps d'exécution p_{mi} par unité de produit i ($1 \dots N$) sur une machine m ($1 \dots M$) de chaque tâche ne dépend ni du produit ni de la machine. Il n'y a pas de relation entre le temps d'exécution d'un produit identique sur deux machines différentes. Un exemple est donné dans la table 4.1.

p_{mi}	1	2	3	4	5	6
1	2	6	3	8	7	4
2	3	8	4	8	8	4
3	2	5	3	9	6	3

TABLEAU 4.1 – Exemple de temps de production p_{mi} par tâche i dans un système non relié pour chaque machine m

Les caractéristiques du problème, inspiré du cas réel de Petit Bateau, nous amènent à considérer des temps de changement qui sont importants. Ces temps de changement dépendent à la fois des machines mais également de la séquence d'ordonnancement, de l'ordre des tâches sur la machine. Cette donnée est notée s_{mij} . Il s'agit du temps de changement nécessaire sur la machine m ($1 \dots M$) entre la tâche i ($0 \dots N$) précédent directement la tâche j ($1 \dots N$). Les changements sont réalisés par une équipe spécialisée en charge d'effectuer les réglages sur les machines nécessaires pour passer d'un support (produit) à un autre. L'équipe est composée de 5 membres, ils sont donc des ressources limitées à prendre en considération lors

de l'ordonnancement. Un autre paramètre est à considérer : contrairement aux opérateurs présents 24h/24, aucun régleur n'est présent la nuit et leur nombre est variable au cours de la journée. C'est pourquoi, il est important de bien positionner les réglages dans le planning de production et d'anticiper les changements pour ne pas pénaliser la production de nuit. Le nombre de régleurs disponibles à un instant t ($1 \dots H$) est noté B_t . Une autre contrainte venue de la réalité du terrain : toutes les machines ne sont pas en capacité de réaliser tous les produits. Seuls les couples machine m ($1 \dots M$) et produit i ($1 \dots N$) dont e_{mi} est égal à 1 peuvent être associés. Pour finir, le splitting n'est pas autorisé. Une tâche ne peut pas être découpée en plusieurs tâches. Les ordres de fabrication sont pré-découpés en sous-tâches respectant les tailles de lot standard de l'entreprise (Figure 4.1). Les tailles de lot dépendent de la capacité des machines de teinture nécessaires à l'étape de production suivante. Un même produit fabriqué sur deux machines différentes doit avoir deux numéros d'OF distincts pour garantir la traçabilité du produit. La quantité de tâches à réaliser sur l'horizon de temps H , soit une semaine, est fournie par l'équipe de planification (planification tactique sur un horizon de 6 mois). L'ensemble des tâches d'une semaine doit être fini avant la semaine suivante sans priorité particulière entre les OF d'une même semaine. L'objectif de l'ordonnancement fixé et défini avec les équipes de Petit Bateau est de finir l'ensemble des tâches le plus tôt possible. Cela se traduit par l'objectif de minimisation de la date de fin de la dernière tâche ordonnancée donc de minimiser le c_{max} .



FIGURE 4.1 – Exemple de découpage d'un OF de 456 kg en quatre lots de 114 kg

4.2 État de l'art

4.2.1 L'ordonnancement

Les problèmes d'ordonnancement sont des sujets très opérationnels dans les entreprises. Ils sont souvent laissés à la charge du responsable d'atelier sans forcément lui donner les outils adaptés pour prendre ce type de décision comme c'est le cas au sein de Petit Bateau. L'horizon de décision étant généralement assez court (entre 1 jour à 1 semaine), la logique permet de trouver des solutions réalisables. Pourtant ce n'est pas toujours les solutions les plus optimales qui sont retenues dans ce contexte et de nombreuses contraintes (matériels et humaines) viennent ajouter de la complexité.

Les ateliers peuvent être décrits de plusieurs façons selon le type de flux qui y circule. Des méthodes d'ordonnancement appropriées à chacun existent. Les contraintes vont être différentes :

- Atelier de machines parallèles : une seule étape de fabrication est réalisée dans l'atelier et plusieurs machines sont capables de la réaliser. Les machines peuvent être identiques, uniformes ou non reliées. Exemple : un atelier de tricotage est composé de machines parallèles non reliées. Elles font toutes la même opération avec des caractéristiques différentes.
- Atelier flow shop : le processus de fabrication est composé de plusieurs étapes successives les unes aux autres. Tous les produits vont suivre le même flux de production. Exemple : un atelier d'assemblage est un enchaînement d'opérations qui se font les unes à la suite des autres dans un ordre défini. Il peut être qualifié d'hybride si sur certaines étapes, plusieurs machines en parallèles peuvent être utilisées ou encore si certains produits peuvent passer une étape ou en ajouter une. Exemple : un atelier de teinture/ finition est composé d'un enchaînement d'étapes de production mais certaines comme la teinture peuvent être réalisées par plusieurs machines mises en parallèles.
- Atelier open shop : chaque produit est fabriqué par une succession d'opérations. Cependant contrairement au flow shop où elles sont réalisées dans le même ordre pour chacun, ici chaque produit a son propre circuit d'étapes à suivre. Exemple : un atelier de production de pièces par usinage où chaque pièce va avoir son propre circuit pour réaliser les étapes d'usinage sur les différents tours.

Il est important de bien qualifier son atelier pour choisir la méthode d'ordonnancement la plus appropriée. Il est également important de savoir quel est l'objectif à optimiser. Plusieurs critères différents peuvent s'appliquer et ils auront un effet totalement différent sur le résultat de l'ordonnancement proposé.

- Date maximum de fin (makespan, c_{max}) : si l'objectif est de terminer l'ensemble de la production le plus rapidement possible, la minimisation de la date de fin maximum va être la plus appropriée. En effet, l'ensemble de la production va être fait le plus tôt possible. Cela peut permettre de libérer de la capacité pour augmenter la capacité de production ou utiliser les machines pour faire des essais en vue de nouvelles productions.
- Temps de séjour du produit ($\sum c_i$) : l'objectif est de minimiser le temps de séjour d'un produit dans le système, c'est-à-dire qu'une fois la première étape commencée, il faut que le produit sorte du système le plus rapidement possible. Cela a également pour effet de réduire les encours présents. Avoir un nombre d'encours important dans un système est le signe d'une forte désynchronisation du flux de production.

- Nombre de retard ou temps de retard : l'objectif est de terminer la production dans les temps impartis par le client. Dans certaines industries, les retards de livraison peuvent être fortement pénalisés.
- Combinaison d'une minimisation des retards mais également des avances : l'objectif est de produire en juste à temps. Produire trop en avance va générer du stockage tandis que livrer en retard va coûter en pénalisation. Trouver et optimiser un juste équilibre entre les deux peut être un objectif pour une entreprise.

Quelque soit le système ou l'objectif choisi, ordonnancer reste un problème complexe avec un fort niveau combinatoire. Un outil d'aide à la décision pour ce type de problème en entreprise sera donc bénéfique pour améliorer la productivité de l'atelier, les niveaux de stocks ou encore tout simplement la visibilité sur la production à venir et l'organisation la plus appropriée à mettre en place.

C'est ce que nous avons cherché à apporter à Petit Bateau. L'ordonnancement était fait de manière empirique en appliquant une règle logique LPT (Longest Processing Time). Les tâches les plus longues étaient positionnées sur les machines capables de les réaliser puis les plus courtes étaient insérées en fonction de la capacité restante sur les machines. Cette façon de fonctionner ne permet pas forcément de voir une optimisation possible en répartissant mieux les OF sur les machines et en prenant en compte les ressources disponibles à la fois humaines et matérielles (machines). La complexité du problème est encore augmentée par la présence de temps de changement qui peuvent varier entre quelques minutes et plusieurs heures. Il est donc essentiel de bien connaître les conséquences de chaque enchaînement de production.

4.2.2 L'ordonnancement de machines parallèles

Un état de l'art sur les problématiques d'ordonnancement de machines parallèles a été réalisé, au cours duquel, plus de 130 travaux ont été analysés.

Le premier papier a été publié par [McNaughton \(1959\)](#) puis l'étude s'est poursuivie avec [Hu \(1961\)](#). Comme il s'agit d'un problème majeur dans l'industrie avec de nombreuses applications, il a été continuellement étudié depuis 1997. La figure 4.2 montre les années de publications de la sélection d'articles sur des problèmes d'ordonnancement de machines parallèles depuis 1997. Pour sélectionner les papiers, nous avons utilisé le moteur de recherche Google Scholar avec les mots clés suivants :

- Scheduling
- Production
- Parallel machines
- Planning production

Trois types différents de problèmes de machines parallèles sont connus dans la littérature :

- machines identiques : le temps de traitement de chaque tâche est le même sur toutes les machines
- machines uniformes : les temps de traitement d'une même tâche sur les différentes machines sont différents mais il existe une relation mathématique entre eux
- machines non reliées : toutes les machines ont des temps de traitement différents, même pour des tâches identiques sans aucune relation entre eux

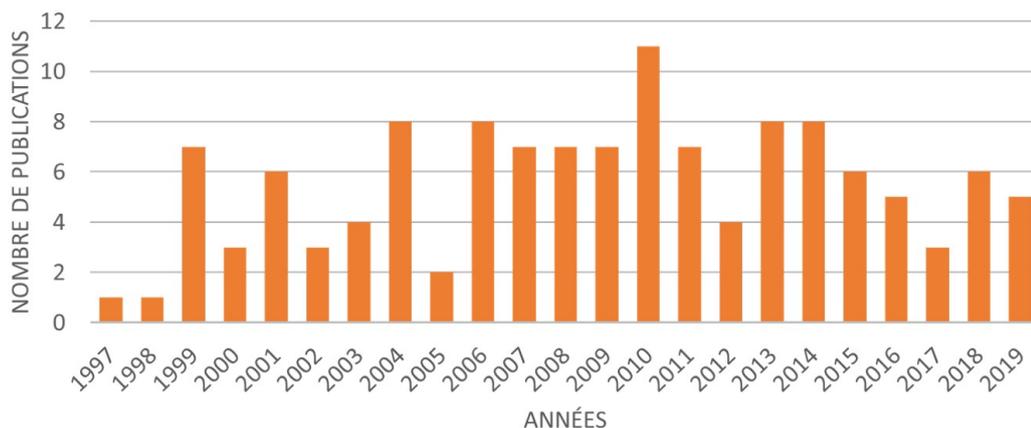


FIGURE 4.2 – Répartition des publications sur les problèmes d'ordonnancement de machines parallèles depuis 1997

La figure 4.3 représente la répartition de ces différents types de problèmes de la littérature basée sur la sélection des 130 publications relatives au problème de machines parallèles. Les problèmes de machines parallèles identiques sont les problèmes les plus étudiés. Cependant, ces dernières années, de plus en plus d'études s'intéressent aux cas de machines non reliées car elles sont plus souvent présentes dans la vie réelle de l'industrie.

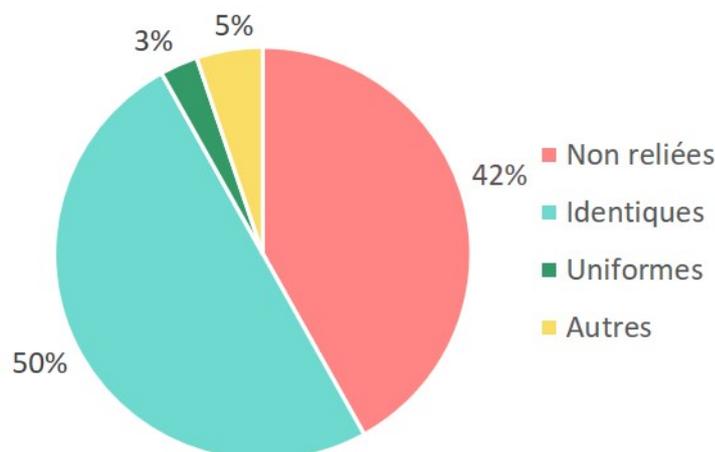


FIGURE 4.3 – Répartition des problèmes de machines parallèles

La première revue de littérature publiée sur les problèmes d'ordonnement de machines parallèles est l'article écrit par [Cheng et Sin \(1990\)](#). Cet article a été le point de départ pour l'auteur [Chen et al. \(1998\)](#) qui a développé un schéma de classification plus important pour les problèmes d'ordonnement. Depuis cela, d'autres auteurs ([Allahverdi et al. \(1999\)](#), [Zhu et Wilhelm \(2006\)](#), [Allahverdi et al. \(2008\)](#), [Pfund et al. \(2004\)](#)) ont réalisé des revues de littérature de problèmes de machines parallèles avec temps de changements. [Allahverdi et al. \(2008\)](#) a réalisé un état de l'art sur les problèmes d'ordonnement avec temps de changement et coûts. [Zhu et Wilhelm \(2006\)](#) ont présenté une étude sur les problèmes d'ordonnement qui inclut des temps de changement dépendant de la séquence de production. [Li et Yang \(2009\)](#) se sont concentrés sur la réalisation d'heuristiques pour les problèmes d'ordonnement de machines parallèles non reliées. Ils ont comparé les résultats de méthodes existantes et proposé un algorithme plus performant. Ces revues montrent qu'un très large éventail de techniques de résolution peut être appliqué à cette catégorie de problèmes.

Plusieurs caractéristiques ont été prises en considération à travers les différentes études sur les problèmes d'ordonnement de machines parallèles. Le caractère non relié des machines est considéré dans ce chapitre. Les études suivantes se concentrent donc sur les problèmes de machines parallèles non reliées avec des temps de changement dépendant de la séquence de production et des machines ($R_m/ST_{SMD}/C_{max}$). [Rabadi et al. \(2006\)](#) ont proposé une méta-heuristique et comparé les résultats avec les solutions existantes sur les mêmes jeux de données. [Arnaout et al. \(2010\)](#) a introduit un algorithme d'optimisation par colonie de four-

mis en deux étapes (ACO) et ses performances ont été validées en comparant avec les autres heuristiques. Quand il n'est pas possible de produire toutes les tâches sur toutes les machines, on dit que l'environnement de production est soumis à une contrainte d'éligibilité des machines (M_i). Cette caractéristique va être prise en compte dans ce chapitre. Ce concept est rarement étudié (Yilmaz Eroglu et Ozmutlu (2017)). Les prochaines citations sont la compilation d'études la considérant. Ruiz et Maroto (2006) ont proposé une méta-heuristique pour des problèmes de flowshop hybride qui inclut des machines parallèles non reliées, avec temps de changement dépendant de la séquence et éligibilité des machines sur chaque étape de production. La méthode a été appliquée dans le cadre de production de carreaux de céramique et une amélioration de 9% a été obtenue sur la valeur de fonction objectif, (c_{max}). Afzalirad et Rezaeian (2016) ont proposé un modèle MIP et deux méta-heuristiques. La valeur de la fonction objectif choisie est le nombre total de tâches en retard. Le problème a pris en compte des temps de changement dépendant de la séquence, des dates de début de tâches, l'éligibilité des machines et des contraintes de précédence. Yilmaz Eroglu et Ozmutlu (2017) se sont concentrés sur un problème réel d'ordonnancement de métier à tisser. L'auteur a étudié la minimisation du makespan pour un système de machines parallèles non reliées et temps de changement dépendant de la séquence, éligibilité des machines et autorisation de splitter les tâches. Une version adaptée d'un algorithme génétique hybride a servi à le résoudre.

Dans la plupart des cas, les ressources nécessaires à la production sont limitées. Les études qui considèrent des serveurs utilisés par exemple pour réaliser les opérations de changement sont appelées des problèmes d'ordonnancement avec serveur commun (Hamzadayi et Yildiz (2017)). Cela peut être étendu à d'autres types de ressources limitées comme le nombre de machines capables de fonctionner en simultané dans notre cas. Deux types de serveur commun sont donc à considérer. Avant l'étude de Bektur et Saraç (2019), seulement des problèmes d'ordonnancement composés d'un système de machines identiques avaient considéré la contrainte d'un serveur commun. Peu d'études sur les ressources partagées ont considéré des temps de changement dépendant de la séquence. Parmi les études sur des machines parallèles identiques avec temps de changement dépendant de la séquence, Hamzadayi et Yildiz (2017) ont proposé un modèle mathématique, un algorithme de recuit simulé et un algorithme génétique pour le problème $P_m/ST_{SD}, S_1/c_{max}$. Différents critères d'objectif ont été étudiés (figure 4.4). Une majorité de papiers considèrent la minimisation du makespan. Wu et Wang (2018) ont choisi de minimiser ce critère dans leur étude. Minimiser la date de fin maximum signifie augmenter la productivité. Une autre possibilité est de considérer la somme de toutes les dates de fin des tâches pour minimiser le temps de présence. Cela permet la réduction de l'encours et du niveau de stock.

Le second objectif le plus utilisé est la minimisation du retard (Suresh et Chaudhuri (1994)). C'est un indicateur classique de l'industrie pour obtenir un bon niveau de service client. La minimisation du nombre de tâches en retard et/ou en avance est souvent utilisée dans le cas de politique de juste-à-temps. D'autres objectifs peuvent être vus comme la minimisation du déséquilibre entre les machines comme dans les travaux de Ouazene *et al.* (2014).

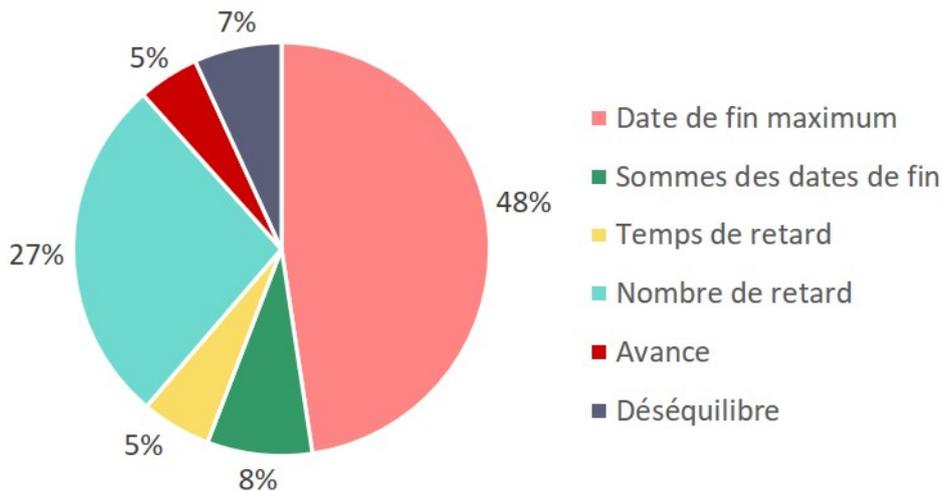


FIGURE 4.4 – Répartition des objectifs étudiés

Différentes méthodes de résolution ont été étudiées. Les plus courantes sont les méthodes basées sur des méta-heuristiques (figure 4.5). Une majorité des travaux étudiés (36%), utilisent un algorithme génétique (AG). Les algorithmes de recuit simulé (SA) sont utilisés dans 14% des cas et la recherche tabou (TS) est aussi largement utilisée dans 12% des papiers. La première catégorie de méthodes qui peut être appliquée aux problèmes d'ordonnancement de machines parallèles sont les méthodes de recherche de solution exacte. Cette catégorie inclut, entre autres, les formulations MIP pour les résolutions par solveur, énumérations et technique de génération de colonnes. Cependant, dû à la nature NP-difficile de ces problèmes d'ordonnancement (Allahverdi *et al.* (2008)), ces techniques sont souvent limitées dans leur utilisation. Cependant, ces techniques peuvent être utilisées pour calculer la solution optimale d'instances de petite taille, qui peuvent servir de benchmark pour évaluer la performance des heuristiques. Rocha *et al.* (2008) ont utilisé une technique de branch and bound pour obtenir une solution exacte du problème complexe d'ordonnancement de machines parallèles. Des instances jusqu'à 30 tâches ont pu être résolues. Les algorithmes méta-heuristiques basés sur une population

initiale et un mécanisme mémétique sont capables d'étendre l'espace de recherche de solutions en combinant des solutions de bonne qualité ensemble. L'algorithme génétique (Holland *et al.* (1992)) est le plus connu et des variations sont toujours fréquemment utilisées pour résoudre les problèmes d'ordonnancement complexes. Weng *et al.* (2001) ont adressé un problème d'ordonnancement d'ensemble de tâches indépendantes sur des machines non reliées avec temps de changement dépendant de la séquence dans l'objectif de minimiser la moyenne pondérée des dates de fin de chaque tâche. Ils ont proposé et testé sept heuristiques. Pour les instances de grandes tailles, les algorithmes génétiques sont plus performants que les recherches locales basées sur des méta-heuristiques (Tavakkoli-Moghaddam *et al.* (2009)).

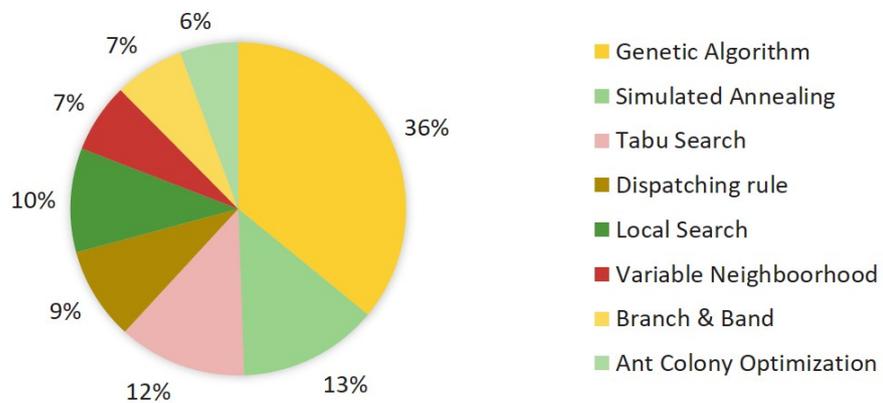


FIGURE 4.5 – Répartition des méthodes approchées utilisées

La figure 4.6 représente la proportion de papiers ayant pris en compte les caractéristiques suivantes :

- Splitting : autoriser le découpage des tâches en plusieurs portions
- Setup : considérer des temps de changement qui peuvent être indépendants, dépendants de la séquence, ou encore dépendants de la séquence et des machines. La figure 4.7 donne la répartition des différents types de temps de changement quand ceux-ci sont considérés
- Machine restriction : prendre en compte les différentes caractéristiques des machines qui n'autorisent pas toutes les tâches à être faites par toutes les machines. On parle également d'éligibilité des machines
- Ressources : tenir compte de ressources nécessaires à la production mais en nombre limité. Ce peut-être des opérateurs, des outillages, des moyens de manutention...

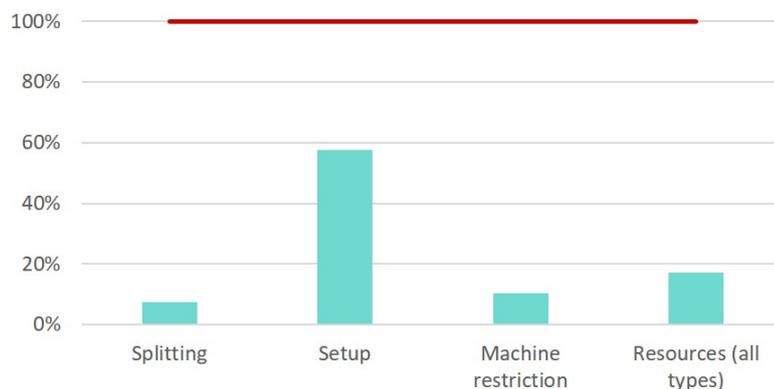


FIGURE 4.6 – Répartition des caractéristiques prises en compte dans les publications

La table 4.2 présente une synthèse des travaux proches de notre problématique utilisés pour développer les méthodes présentées dans les sections suivantes. [Yalaoui et Chu \(2003\)](#) ont étudié un problème d'ordonnancement de machines identiques avec des temps de changement dépendants de la séquence et l'autorisation de splitter dans l'objectif de minimiser le makespan. Ils ont montré l'impact des valeurs de temps de changement sur l'objectif de l'ordonnancement. Une version simple du problème d'ordonnancement de machines parallèles non reliées avec temps de changement dépendant de la séquence et des machines mais sans autre caractéristique et avec l'objectif de minimiser le c_{max} a été étudiée par [Vallada et Ruiz \(2011\)](#). [Yilmaz Eroglu et al. \(2014\)](#) ont étudié le même problème avec l'autorisation de splitter les tâches. [Joo et Kim \(2015\)](#) n'ont pas permis de splitter les tâches mais ont étudié le problème avec éligibilité des machines en minimisant la somme des dates de fin. Avec le même objectif, [Nguyen et al. \(2018\)](#) ont étudié des machines parallèles identiques avec ressources limitées. Leur étude n'a pas pris en compte de temps de changement. L'étude la plus récente et la plus proche de notre problème trouvée au cours de ce travail est celle publiée par [Bektur et Saraç \(2019\)](#). Ce papier étudie $R_m | ST_{SD}, S_1, M_i | \sum w_i T_i$. Ils ont choisi de minimiser le retard total pondéré. Par rapport à notre cas, ils ne considèrent qu'un seul type de ressource. De plus, celui-ci gère l'éligibilité des machines comme dans le cas étudié ici. Pour terminer, la même année, [Fanjul-Peyro et al. \(2019\)](#) ont étudié les machines parallèles non reliées avec temps de changement dépendants de la séquence en minimisant le makespan. Ainsi, à notre connaissance, aucun papier précédent n'a traité du problème de machines parallèles non reliées, avec des temps de réglage dépendants de la séquence et de la machine, deux types de ressources limitées et

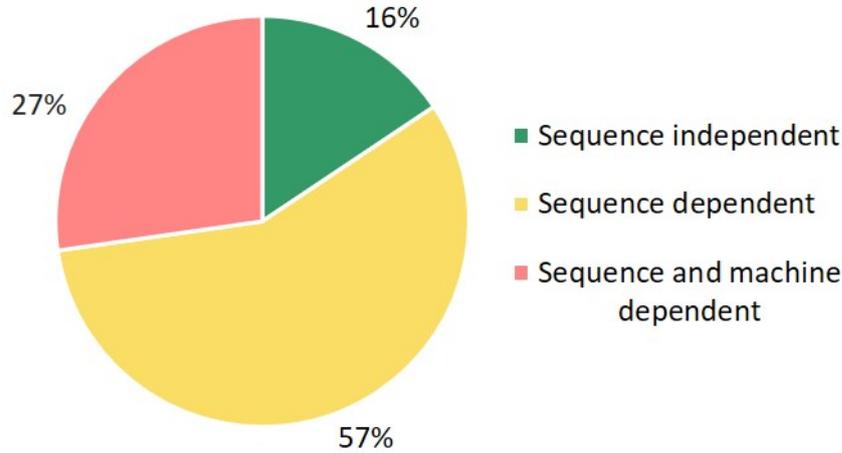


FIGURE 4.7 – Répartition des types de temps de changement

une contrainte d'éligibilité de la machine dont l'objectif est de minimiser le makespan. Notre étude est originale et deux méthodes différentes sont développées pour résoudre ce type de problème :

- un nouveau modèle mathématique
- un algorithme génétique spécifique

4.3 Modèle mathématique

Une nouvelle modélisation mathématique est proposée dans cette section. Le modèle est basé sur un modèle récent développé par [Fanjul-Peyro *et al.* \(2019\)](#). Ce modèle résout le problème de machines parallèles non reliées avec temps de réglage dépendants de la machine et de la séquence afin de minimiser le makespan ($R_m|ST_{SD}|C_{max}$). Le modèle a été construit en ajoutant au fur et à mesure les différentes caractéristiques propres au problème étudié (figure 4.8). Le papier écrit par [Afzalirad et Rezaeian \(2016\)](#) a été utilisé pour ajouter les contraintes d'éligibilité des machines. Enfin, la méthode utilisée par [Nguyen *et al.* \(2016\)](#) a servi à intégrer les contraintes sur les ressources limitées liées aux opérateurs et régleurs. Cette méthode nécessite la discrétisation du temps. C'est pourquoi le modèle présenté ci-dessous intègre le temps comme un indice de variable. Une approche intégrant le splitting a été envisagée mais ce n'était finalement pas une contrainte donnée par l'entreprise.

	Caractéristiques					Objectifs		
	MT	CO	SP	ME	LR	MS	SC	T
Notre problème	UR	SMD		x	x	x		
Yalaoui et Chu (2003)	I	SD	x			x		
Vallada et Ruiz (2011)	UR	SMD				x		
Yilmaz Eroglu <i>et al.</i> (2014)	UR	SMD	x			x		
Joo et Kim (2015)	UR	SMD		x			x	
Nguyen <i>et al.</i> (2018)	I				x		x	
Bektur et Saraç (2019)	UR	SD		x	x			x
Fanjul-Peyro <i>et al.</i> (2019)	UR	SMD				x		
Bitar <i>et al.</i> (2021)	UR	SMD		x	x		x	x

MT : Type de machine : Identique (I) / Uniforme (UF) / Non reliée (UR); CO : Changement : Indépendant de la séquence (SI) / Dépendant de la séquence (SD) / Dépendant de la séquence et de la machine (SMD); SP : Splitting; ME : Contrainte d'éligibilité des machines; LR : Ressource limitée; MS : Makespan; SC : Somme des Completion time; T : Retard

TABLEAU 4.2 – Positionnement du problème

4.3.1 Notations

- \mathcal{N} : ensemble de tâches
- $N \in \mathbb{N}$: nombre de tâches
- "0" : tâche fictive ($p_0 = 0, N \cup \{0\} = N_0$)
- $i, j = 1 \dots N$: index des tâches
- \mathcal{M} : ensemble des machines
- $M \in \mathbb{N}$: nombre de machines
- m : index des machines
- H : horizon de temps
- $t = 1 \dots H$: index de temps
- \mathcal{W} : ensemble des zones
- $W \in \mathbb{N}$: nombre de zone
- $w = 1 \dots W$: index des zones

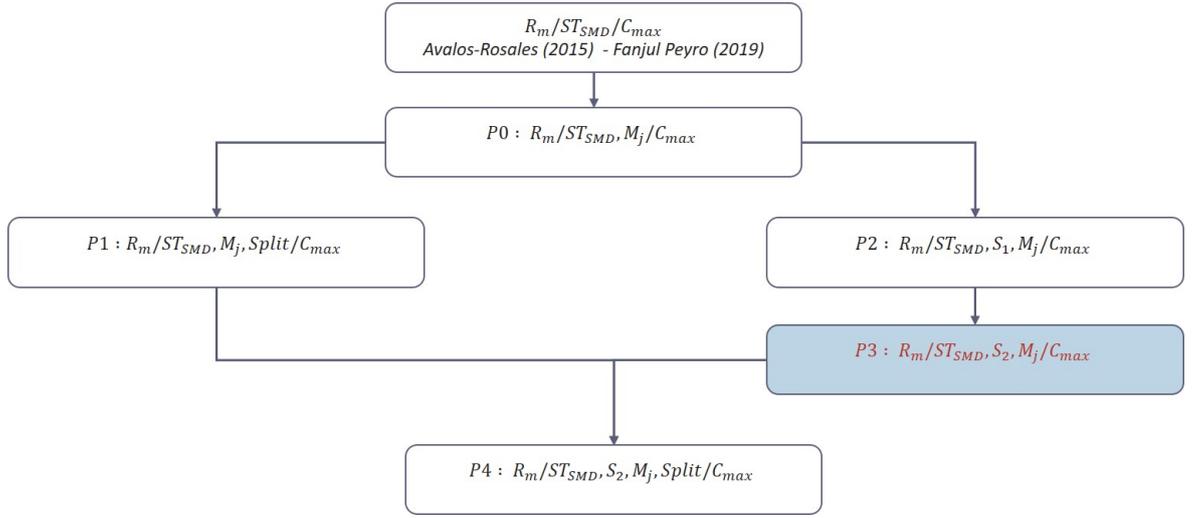


FIGURE 4.8 – Construction du modèles mathématique qui correspond au problème Petit Bateau

4.3.2 Données

- $p_{mi} \in \mathbb{N}$: temps de production de la machine m ($m \in \mathcal{M}$) pour faire la tâche i ($i \in \mathcal{N}$)
- $s_{mij} \in \mathbb{N}$: setup time sur la machine m entre la tâche i et la tâche j , i précédant directement j
- $e_{mi} \in \{0, 1\}$: éligibilité de la machine m à réaliser la tâche i
- $U_w \in \mathbb{N}$: nombre maximum de machines capables de fonctionner en simultanément sur la zone w
- $B \in \mathbb{N}$: nombre de types de ressources " régleur " disponibles sur l'horizon H
- $z_{mw} \in \{0, 1\}$: affectation de la machine m à la zone w
- $V \in \mathbb{N}$: grand nombre

4.3.3 Variables de décision

$$x_{mij} = \begin{cases} 1 & \text{si la tâche } i \text{ précède directement la tâche } j \text{ sur la machine } m \\ 0 & \text{sinon} \end{cases}$$

$$y_{mi} = \begin{cases} 1 & \text{si la tâche } i \text{ est affectée à la machine } m \\ 0 & \text{sinon} \end{cases}$$

$$\alpha_{mit} = \begin{cases} 1 & \text{si la machine } m \text{ commence la tâche } i \text{ à l'instant } t \\ 0 & \text{sinon} \end{cases}$$

$$\beta_{mit} = \begin{cases} 1 & \text{si la machine } m \text{ termine la tâche } i \text{ à l'instant } t \\ 0 & \text{sinon} \end{cases}$$

$$\gamma_{mijt} = \begin{cases} 1 & \text{si la machine } m \text{ commence le changement entre les tâches } i \text{ et } j \\ & \text{à l'instant } t \\ 0 & \text{sinon} \end{cases}$$

$$\delta_{mijt} = \begin{cases} 1 & \text{si la machine } m \text{ termine le changement entre les tâches } i \text{ et } j \\ & \text{à l'instant } t \\ 0 & \text{sinon} \end{cases}$$

$c_i > 0$: date de fin de la tâche i

$c_{max} > 0$: date de fin maximum

4.3.4 Fonction objectif

$$\text{Minimiser } c_{max} \tag{4.1}$$

La fonction objectif est de minimiser la date de fin maximum c_{max} sur l'ensemble de toutes les tâches réalisées sur l'horizon H .

4.3.5 Contraintes

— Contraintes de précédence (Séquencement)

$$\sum_{j=1}^N x_{m0j} \leq 1, \forall m \in \mathcal{M} \tag{4.2}$$

$$\sum_{m=1}^M y_{mi} = 1, \forall i \in \mathcal{N} \tag{4.3}$$

$$y_{mi} \geq \sum_{j=1, i \neq j}^N x_{mij}, \forall m \in \mathcal{M}, i \in \mathcal{N} \tag{4.4}$$

$$y_{mj} \leq \sum_{i=0, i \neq j}^N x_{mij}, \forall m \in \mathcal{M}, j \in \mathcal{N} \quad (4.5)$$

Contraintes d'initialisation

$$\alpha_{m00} = 1, \forall m \in \mathcal{M} \quad (4.6)$$

$$\beta_{m00} = 1, \forall m \in \mathcal{M} \quad (4.7)$$

Contraintes de temporalité

$$\sum_{t=0}^H \alpha_{mit} = y_{mi}, \forall m \in \mathcal{M}, i \in \mathcal{N} \quad (4.8)$$

$$\sum_{t=0}^H \beta_{mit} = y_{mi}, \forall m \in \mathcal{M}, i \in \mathcal{N} \quad (4.9)$$

$$\sum_{t=0}^N (\beta_{mit} - \alpha_{mit}) \leq 1 - y_{mi}, \forall m \in \mathcal{M}, i \in \mathcal{N} \quad (4.10)$$

$$\sum_{t=0}^H \gamma_{mijt} = x_{mij}, \forall m \in \mathcal{M}, i \in \mathcal{N}_0, j \in \mathcal{N} \quad (4.11)$$

$$\sum_{t=0}^H \delta_{mijt} = x_{mij}, \forall m \in \mathcal{M}, i \in \mathcal{N}_0, j \in \mathcal{N} \quad (4.12)$$

$$\sum_{t=0}^H t * \gamma_{mijt} + V * (1 - x_{mij}) \geq \sum_{t=0}^H t * \beta_{mit}, \forall m \in \mathcal{M}, i \in \mathcal{N}_0, j \in \mathcal{N} \quad (4.13)$$

$$\sum_{t=0}^H t * \delta_{mijt} \leq \sum_{t=0}^H t * \alpha_{mit} + V * (1 - x_{mij}), \forall m \in \mathcal{M}, i \in \mathcal{N}_0, j \in \mathcal{N} \quad (4.14)$$

La contrainte (4.2) garantit qu'au maximum une tâche peut être programmée après la tâche fictive. La contrainte suivante garantit que toutes les tâches sont assignées à une seule machine. La contrainte (4.4) garantit que chaque tâche sur chaque machine a au maximum un successeur. La contrainte (4.5) garantit que chaque tâche sur chaque machine a au maximum un prédécesseur. La contrainte (4.6) (resp. (4.7)) définit la date de début (resp. la date de fin) de la tâche fictive à l'instant 0. La contrainte (4.8) (resp. (4.9)) garantit que si une tâche est affectée à une machine, elle a une date de début (resp. une date de fin). Sur la figure 4.9, quand $\alpha = 1$, y vaut 1 tant que β n'est pas égal à 1 après. La contrainte suivante

est utilisée pour accélérer la résolution du modèle. Elle garantit que si une tâche est assignée à une machine, elle a une date de début et une date de fin sur cette machine. Les contraintes (4.11), (4.12) sont similaires aux contraintes (4.8), (4.9), mais appliquées aux temps de réglage. La contrainte (4.13) garantit que le réglage entre les tâches i et j commence après la fin de la tâche précédente i et la contrainte (4.14) que le réglage se termine avant le début de la tâche suivante j .

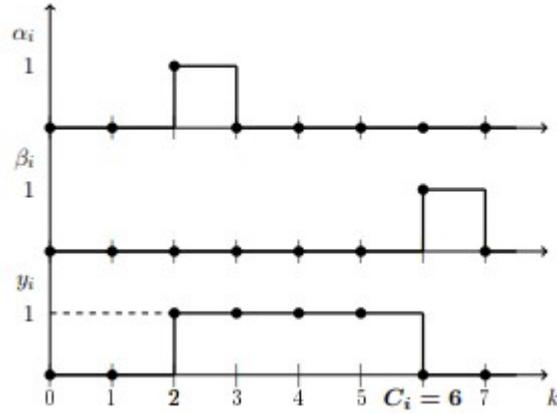


FIGURE 4.9 – Fonctionnement des variables binaires α et β (Nguyen (2017))

— Contraintes liées à la durée des tâches

$$\sum_{t=0}^H t * (\beta_{mit} - \alpha_{mit}) = p_{mi} * y_{mi}, \forall m \in \mathcal{M}, i \in \mathcal{N} \quad (4.15)$$

$$\sum_{t=0}^H t * (\alpha_{mjt} - \beta_{mit}) + V * (1 - x_{mij}) \geq \sum_{t=0}^H t * (\delta_{mijt} - \gamma_{mijt}), \forall m \in \mathcal{M}, i \in \mathcal{N}_0, j \in \mathcal{N} \quad (4.16)$$

$$\sum_{t=0}^H t * (\delta_{mijt} - \gamma_{mijt}) = s_{mij} * x_{mij}, \forall m \in \mathcal{M}, i \in \mathcal{N}_0, j \in \mathcal{N} \quad (4.17)$$

La contrainte (4.15) garantit que le temps entre la date de début de la tâche i et la date de fin est égal à la durée de traitement de la tâche (Figure 4.9). La contrainte (4.16) garantit que le temps entre la fin de la tâche précédente i et le début de la tâche suivante j sur la machine m est plus long que la durée du temps de réglage. Et la contrainte (4.17) garantit que le temps alloué pour le changement est égal au temps nécessaire aux réglages entre les tâches i et j .

— Contrainte de limitation du nombre de ressources utilisées

$$\sum_{m=1}^M \sum_{i=1}^N \sum_{\tau=0}^t (\alpha_{mi\tau} - \beta_{mi\tau}) * z_{mw} \leq U_w, \forall t \in H, w \in \mathcal{W} \quad (4.18)$$

$$\sum_{m=1}^M \sum_{i=0}^N \sum_{j=1}^N \sum_{\tau=0}^t (\gamma_{mij\tau} - \delta_{mij\tau}) \leq B, \forall t \in H \quad (4.19)$$

$$y_{mi} \leq e_{mi}, \forall m \in \mathcal{M}, i \in \mathcal{N} \quad (4.20)$$

La contrainte (4.18) limite le nombre de machines fonctionnant en même temps dans une même zone. De la même façon que précédemment, avec la figure 4.9, on comprend qu'une ressource est comptée utilisée depuis que α a pris la valeur 1 et tant que β n'a pas de temps passé à 1 en sommant sur le temps discrétisé. La contrainte (4.19) limite le nombre de régleurs affectés à une tâche de réglage en même temps. La contrainte (4.20) garantit que si une tâche est assignée à une machine, la tâche est autorisée à être effectuée par cette machine.

— Contrainte de calcul de la fonction objectif

$$c_i = \sum_{m=1}^M \sum_{t=0}^H t * \beta_{mit}, \forall i \in \mathcal{N} \quad (4.21)$$

$$c_0 = 0 \quad (4.22)$$

$$c_{max} \geq c_i, \forall i \in \mathcal{N} \quad (4.23)$$

La contrainte (4.21) calcule la date de fin de la tâche i sur la machine m . La contrainte (4.22) définit la date de fin de la tâche fictive à 0. La dernière contrainte calcule la date maximum de fin pour l'ensemble des tâches sur l'horizon d'ordonnancement.

Ce modèle est une bonne représentation mathématique du problème. Cependant, il n'est pas utilisable pour résoudre des problèmes de taille réelle de notre partenaire industriel.

4.4 Algorithme génétique

Pour résoudre le problème de taille réelle, un algorithme de type itératif a été développé. Il s'agit d'un algorithme génétique. Ce type d'algorithme est souvent utilisé dans la littérature pour son efficacité comme évoqué à la section 4.2. Il s'agit

d'un algorithme inspiré de la théorie de l'évolution de Darwin. Il est utilisé depuis les années 60 et son fonctionnement est basé sur la création d'une population d'individus. Un individu est représenté par un chromosome sur lequel des opérations d'évolution seront appliquées. Le principe général de fonctionnement de ce type d'algorithme est décrit en section 3.5.1.

Les spécificités et les nouveautés apportées pour répondre au problème d'ordonnement sont décrites dans la section suivante. De nouveaux opérateurs de croisement et de mutation spécifiques au problème étudié sont utilisés dans l'algorithme. Ils se concentrent sur l'optimisation de l'utilisation des ressources pour améliorer la solution. La représentation de la solution a été sélectionnée pour prendre en considération les deux types de ressources limitées. Ce n'est pas la représentation la plus souvent utilisée pour ce type d'algorithme (section 4.4.1).

4.4.1 Représentation de la solution, décodage, initialisation de la population et opérateur de sélection

La représentation la plus commune pour les problèmes de machines parallèles consiste en une liste de tâches pour chaque machine. Chaque liste représente l'ordre de la séquence des tâches sur la machine affectée [Vallada et Ruiz \(2011\)](#) (figure 4.10) . Dans notre cas, chaque tâche nécessite l'utilisation de ressources limitées en plus de la ressource machine. La représentation de la solution doit donc permettre en plus de donner un séquençement sur chaque machine, de définir un ordre d'utilisation des différentes ressources communes. Cela n'est pas le cas dans la représentation standard. Un double chromosome a été choisi pour cet algorithme. La représentation est une table de 2 lignes et d'autant de colonnes que de tâches à ordonner. Dans la première ligne, chaque job est affecté une fois et le séquençement donne l'ordre de décodage. La machine affectée à chaque tâche est indiquée dans la seconde ligne. Par cette représentation de chromosome, aucun conflit d'affectation aux ressources ne sera généré. Un exemple est proposé en figure 4.11. Dans cet exemple, la tâche 3 va précéder la tâche 1 qui précédera la tâche 2 dans le décodage. La seconde ligne donne l'affectation des machines aux tâches. Les tâches 1 et 3 seront affectées à la machine 2 et la tâche 2 à la machine 1. Plusieurs opérateurs de croisement et mutation (standards et spécifiques au problème) sont appliqués pour créer une nouvelle population à chaque génération.

De manière à décoder la solution pour l'évaluer, la table est parcourue de la gauche vers la droite. Les tâches sont affectées aux machines correspondantes dans l'ordre de lecture. Si une ressource n'est pas disponible, la tâche attend jusqu'à la libération de la ressource et sa date de début est décalée. A l'ordonnement

		Tâches		
Machine 1		3	2	5
Machine 2		4	1	6

FIGURE 4.10 – Représentation d'un chromosome sous forme d'une séquence par machine

Tâche	3	1	2
Machine	2	2	1

FIGURE 4.11 – Représentation d'un chromosome utilisée

de la dernière tâche, la date de fin la plus importante est enregistrée comme la valeur d'évaluation de la solution : c_{max} . La procédure d'évaluation d'un individu est donnée dans l'algorithme 4.

Algorithme 4 : Procédure d'évaluation

- 1: Initialisation de la disponibilité de chacune des ressources (machines, zones, régleurs)
 - 2: **pour** chaque tâche j sur la machine m selon l'ordre et l'affectation de la séquence **faire**
 - 3: Calcul de la date de début de changement : $setup_s = \max(\text{première date de disponibilité d'un régleur, date de disponibilité de la machine } m)$
 - 4: Calcul de la date de fin de changement : $setup_f = setup_s + s_{mij}$
 - 5: Calcul de la date de début de la tâche : $x = \max(setup_f, \text{date de disponibilité de la machine } m, \text{date de disponibilité de la zone } w_m)$
 - 6: Calcul de la date de fin de la tâche : $c_j = x + p_{mj}$
 - 7: Enregistrement de la tâche j comme dernière tâche i sur la machine m
 - 8: Mise à jour des dates de disponibilité des ressources (machine m , zone w_m and régleur)
 - 9: **fin pour**
 - 10: Retour de la date de fin maximum $c_{max} = \max c_i$ comme valeur d'évaluation de la solution
-

Un exemple pour illustrer la procédure d'évaluation est donné ci-dessous. Six tâches sont à ordonnancer sur trois machines parallèles non reliées. Les temps d'exécution des tâches sont donnés dans la table 4.3 et les temps de changement dans la table 4.4. Un régleur est disponible pour les trois machines. Les machines 1 et 3 sont considérées dans la même zone. Maximum une machine peut fonctionner à chaque instant dans une zone. Par conséquence, les machines 1 et 3 ne peuvent

pas fonctionner en simultané. Un exemple de solution est donné en figure 4.12 et l'ordonnancement correspondant est illustré en figure 4.13. Sur cette figure, les temps de changement sont représentés hachurés.

Job	6	4	3	5	1	2
Machine	1	2	3	2	2	3

FIGURE 4.12 – Exemple de la représentation d'une solution dans un chromosome

p_{mi}	1	2	3	4	5	6
M1	18	15	10	16	14	15
M2	12	20	18	12	10	12
M3	15	10	14	16	12	18

TABLEAU 4.3 – Temps d'exécution des tâches de l'exemple

s_{1ij}	1	2	3	4	5	6	s_{2ij}	1	2	3	4	5	6	s_{3ij}	1	2	3	4	5	6
1	0	1	2	4	3	1	1	0	2	3	3	4	4	1	0	2	5	1	1	3
2	1	0	4	4	1	4	2	2	0	1	1	4	2	2	4	0	3	1	1	1
3	2	4	0	3	3	3	3	4	3	0	4	3	4	3	0	2	5	1	1	3
4	3	2	4	0	1	2	4	4	4	2	0	1	1	4	4	0	3	1	1	1
5	4	4	3	3	0	4	5	1	2	4	3	0	4	5	1	1	1	2	0	1
6	4	1	1	2	1	0	6	2	3	2	3	2	0	6	1	2	2	1	3	0

TABLEAU 4.4 – Temps de changement de l'exemple

Pour lire et évaluer la solution, la première tâche de la séquence (tâche 6) est affectée à la machine 1. Il s'agit de la première tâche donc il n'y a pas de temps de changement ni de temps de préparation qui ont pu être anticipés avant et toutes les ressources sont disponibles. La seconde tâche à être ordonnancée est la tâche 4 sur la machine 2. La tâche suivante dans la séquence est la 3 affectée à la machine 3. Cette tâche ne peut commencer qu'une fois la tâche 6 terminée comme les machines 1 et 3 ne peuvent pas fonctionner en même temps car dans la même zone. La tâche 3 commence donc à l'instant 15. Puis avec le même mécanisme, les tâches 5, 1 et 2 sont ordonnancées quand les changements sont faits. La fin de chaque tâche est calculée en ajoutant le temps d'exécution de la tâche sur la machine à la date de début. La date de début dépend de la disponibilité de la machine, soit la fin du changement soit sa disponibilité par rapport aux machines déjà en fonctionnement dans la zone. Pour finir, la date de fin de l'ensemble de l'ordonnancement c_{max} est déterminée par la dernière date de fin d'une tâche sur l'horizon (pas forcément la

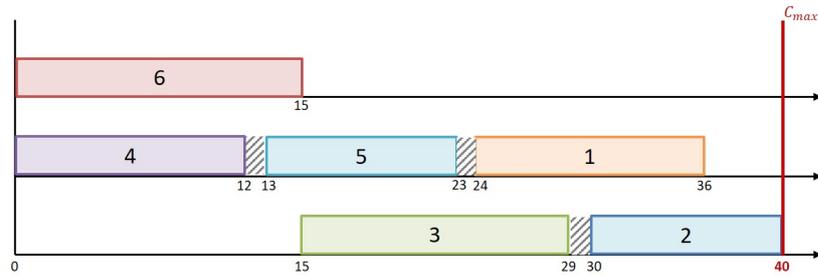


FIGURE 4.13 – Décodage de la séquence solution de l'exemple

dernière tâche de la séquence). Dans ce cas, il s'agit de l'instant 40 dû à la fin de la tâche 2 (figure 4.13).

Pour initialiser la population de solutions initiales, comme dans de nombreuses études, une génération aléatoire est utilisée. La prochaine tâche affectée est sélectionnée aléatoirement dans les tâches non encore positionnées. La machine affectée est également choisie de manière aléatoire dans un ensemble de machines éligibles pour cette tâche. Avec cette procédure d'initialisation aucune infaisabilité n'est générée et une procédure de réparation n'est pas nécessaire. Chaque individu de la population initiale est évalué. Une probabilité de sélection pour chaque individu est alors calculée à partir de la valeur d'évaluation c_{max} de l'individu. Plus la valeur de c_{max} est faible, plus la solution a de chance d'être sélectionnée pour être solution parent et générer un nouvel individu par croisement. La sélection est faite de manière aléatoire en suivant la loi discrète de probabilité générée par les évaluations de c_{max} .

4.4.2 Opérateurs de croisement et de mutation

Une fois la sélection effectuée et les parents choisis, l'opération de croisement est effectuée. Plusieurs opérateurs sont utilisés dans l'AG. Certains sont issus de la littérature et d'autres ont été créés spécialement pour ce problème. En général, l'objectif de l'opération de croisement est de générer un nouvel individu à partir de deux individus parents sélectionnés dans l'objectif d'améliorer la qualité de la solution obtenue. Les opérateurs ont été conçus de manière à ne générer que des solutions réalisables. Ainsi, il n'y a pas nécessité d'utiliser une procédure de réparation.

Six opérateurs de croisements différents sont proposés. Le choix de l'utilisation d'un opérateur est aléatoire avec une probabilité identique pour chacun. La performance des croisements est étudiée dans la section 4.5.2.

- Croisement en un point (figure 4.14) :
Il s'agit d'un opérateur standard de la littérature. Un point de croisement est généré de manière arbitraire. La partie gauche du segment du parent 1 est reporté à l'identique dans l'individu enfant. La seconde partie de l'enfant est complétée avec les tâches non encore affectées et les machines correspondantes suivant l'ordre du second parent. Cela assure l'unicité de chacune des tâches dans l'ordonnancement résultant.
- Croisement en deux points (figure 4.15) :
Cet opérateur de croisement est très similaire au premier. Deux points de croisement sont générés de façon arbitraire au lieu de un. Les parties extérieures aux deux points du segment sont reportées à l'identique dans l'individu enfant. La partie interne est complétée par les tâches non encore affectées suivant l'ordre du second parent.
- Croisement de l'affectation des machines (figure 4.16) :
Cet opérateur reporte l'ensemble des tâches du parent 1 dans l'individu enfant en conservant l'ordre de la séquence. Pour chaque tâche, la machine affectée est la machine de cette tâche dans le parent 2. Par ce mécanisme, aucune infaisabilité n'est générée puisque l'éligibilité des couples tâche/machine associés était déjà validée dans le second parent.
- Croisement par sélection aléatoire (figure 4.17) :
Cet opérateur parcourt le premier parent dans l'ordre de la séquence. Pour chaque tâche, le choix de la reporter dans l'individu enfant avec la machine associée et sur le même emplacement dans la séquence est fait selon une probabilité donnée, ici choisi équiprobable : 50% de chance de reporter. Les autres tâches sont complétées suivant l'ordre de l'individu parent 2.
- Croisement par regroupement de la meilleure zone (figure 4.18) :
Pour cet opérateur, le parent 1 est évalué au préalable pour identifier la zone avec le meilleur c_{max} . Toutes les tâches affectées à des machines de cette zone sont regroupées au début de la séquence de l'individu enfant. La séquence est ensuite complétée avec les tâches non affectées dans l'ordre du second parent. Dans l'exemple d'illustration, la meilleure zone est supposée être composée de la machine 1.
- Croisement par conservation de la meilleure zone (figure 4.19) :
Ce dernier opérateur est très proche du précédent. Cependant, les tâches reportées du premier parent à l'enfant conservent leur emplacement dans l'ordre de la séquence. Puis la séquence est complétée en suivant le parent 2. Dans l'exemple d'illustration, la meilleure zone est supposée être composée de la machine 1.

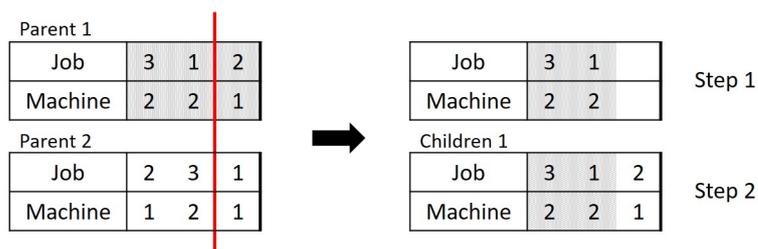


FIGURE 4.14 – Exemple de croisement en un point

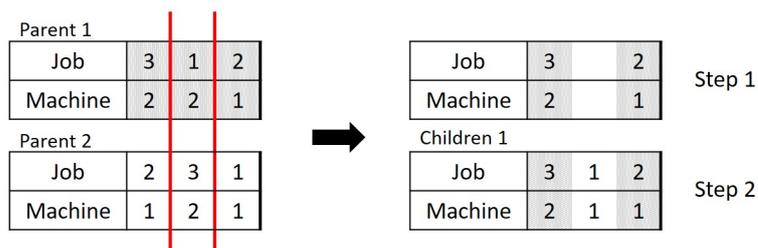


FIGURE 4.15 – Exemple de croisement en deux points

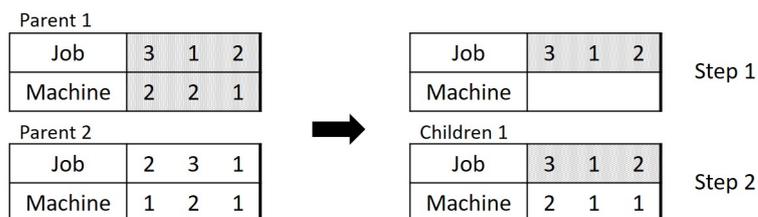


FIGURE 4.16 – Exemple de croisement de l'affectation des machines

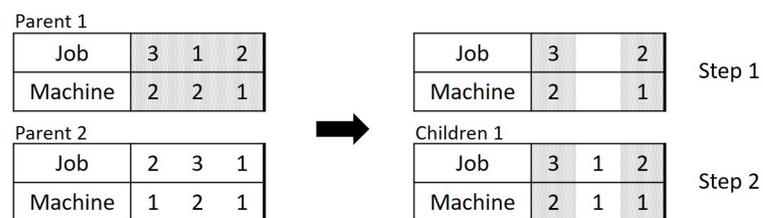


FIGURE 4.17 – Exemple de croisement par sélection aléatoire

Pour permettre la diversification au travers des générations créées, différents opérateurs de mutation sont appliqués sur les individus enfants créés après croisement avec une probabilité p_m . Chaque opérateur de mutation a la même probabilité d'être appliqué. L'objectif de l'utilisation de ces mutations n'est pas de créer de meilleurs individus mais de permettre à l'algorithme de s'extraire d'un optimal

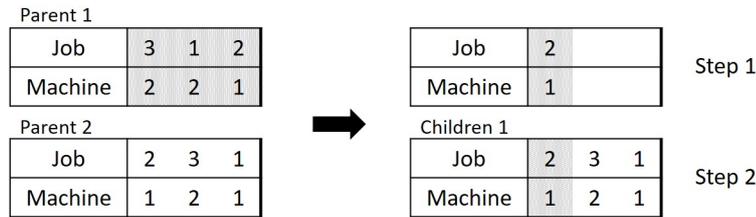


FIGURE 4.18 – Exemple de croisement par regroupement de la meilleure zone

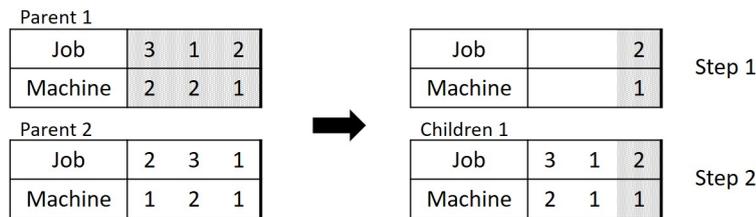


FIGURE 4.19 – Exemple de croisement par conservation de la meilleure zone

local en appliquant des opérateurs d'exploration. Au contraire, les opérateurs de recherche locale sont supposés trouver de meilleures solutions à partir d'une solution initiale par exploration du voisinage de la solution.

Quatre opérateurs de mutation différents sont proposés dans cette méthode. Les deux derniers sont originaux car ils sont spécifiquement dédiés au problème de Petit Bateau :

— Mutation par échange :

Cet opérateur standard échange deux tâches dans la séquence du chromosome et conserve l'affectation des machines aux tâches.

— Mutation par déplacement :

Ce second opérateur standard déplace une tâche et la machine qui lui est affectée à un autre emplacement dans l'ordre de la séquence.

— Mutation de la moins bonne machine (figure 4.20) :

L'individu doit au préalable être évalué pour appliquer cet opérateur. La machine avec le moins bon c_{max} est identifiée. Toutes les tâches affectées à cette machine sont aléatoirement affectées à une nouvelle machine parmi celles capables de réaliser la tâche. Les tâches peuvent être affectées à la même machine ou à une machine différente. La charge de la machine identifiée peut ainsi être réduite en se reposant sur d'autres machines moins chargées. L'ordre de la séquence n'est pas modifié par cette mutation. Dans l'exemple, la machine avec le c_{max} le plus important est supposée être la machine 1.

- Mutation par groupement des sous-lot d'une tâche (figure 4.21) :
 Dans le problème étudié, une tâche peut être découpée en sous-tâches selon la taille de lot prédéfinie. Le temps de changement entre deux sous-lots d'une même tâche initiale est nul. L'objectif de cet opérateur est donc de regrouper dans la séquence les sous-lots d'une même tâche affectés à une même machine pour réduire les potentiels temps de changement et ainsi réduire la date de fin maximum. Dans l'exemple, les tâche 1 et 2 sont supposées être 2 sous lots d'un même OF.

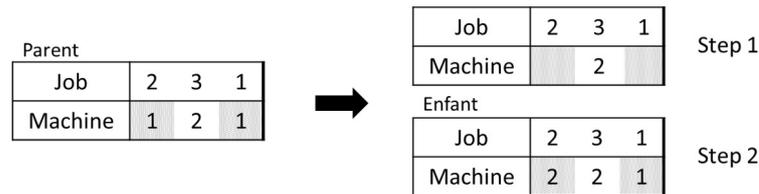


FIGURE 4.20 – Exemple de mutation de la moins bonne machine



FIGURE 4.21 – Exemple de mutation par groupement des sous-lot d'une tâche

4.4.3 Procédure de génération suivante

Des enfants sont générés à partir des parents de la génération précédente jusqu'au doublement de la taille de la population. Une nouvelle génération est ensuite créée à partir des anciens individus et des nouveaux créés par croisement et mutation. L'ensemble de la population (de taille doublée) est trié en fonction de la valeur d'évaluation de chaque solution en ordre croissant. Une proportion ρ des meilleurs individus est conservée dans la population de la génération suivante. Pour compléter la population, d'autres individus dans les moins bons sont sélectionnés aléatoirement. Cela permet de construire une nouvelle population utilisée pour construire la génération suivante.

4.5 Campagne de tests numériques - cas théoriques

Afin de valider l'algorithme génétique qui va être utilisé par l'entreprise, le modèle mathématique et l'AG sont comparés sur des instances de petite taille. Le solveur CPLEX-ILOG a été utilisé pour résoudre le modèle mathématique sur ces instances. L'algorithme est implémenté en code Python sur un ordinateur HP Latitude (2.50 GHz / 8.00 Go). Des résultats réels seront également présentés.

4.5.1 Générateur d'instances de petite taille

Comme aucun autre auteur n'a traité le problème étudié ici, il n'existe pas de benchmark de référence pour ce type de problème. C'est pourquoi, de nouveaux groupes d'instances sont générés de manière aléatoire. Il s'agit d'instances avec $N = 8$ ou 15 tâches à ordonnancer sur $M = 3$ machines parallèles non reliées. La génération est basée sur la loi de distribution uniforme en nombres entiers. Les temps de production sont générés entre 1 et 9 ou 1 et 99 unités de temps comme réalisé par [Fanjul-Peyro et al. \(2019\)](#). Après la génération des temps de production, les temps de changement s_{mij} sont générés par $a * \min(p_{mi}, p_{mj})$, où a est un coefficient généré aléatoirement entre $[A, B]$, avec A et B des paramètres de contrôle des valeurs générées caractérisant l'importance des temps de changement par rapport au temps de production. Cette méthode de génération de temps de réglage est donnée par [Yalaoui et Chu \(2003\)](#). Pour chaque groupe, dix instances sont générées.

Dans l'objectif de déterminer un horizon de temps H défini, une borne supérieure sur le temps nécessaire à la réalisation de toutes les tâches est calculée par l'équation (4.24).

$$H = \max_{w \in \mathcal{W}} \left(\sum_{j=1}^N (\max_{m \in \mathcal{M}} (p_{mj} * e_{mj} * z_{mw})) \right) + \sum_{j=1}^N (\max_{m \in \mathcal{M}} (\max_{i \in \mathcal{N}_0} (s_{mij}) * e_{mj})) \quad (4.24)$$

4.5.2 Paramétrage de l'algorithme

Pour utiliser au mieux l'algorithme, il est important de déterminer correctement les paramètres utilisés. Afin de réaliser un plan d'expérience, la méthode taguchi est appliquée. Cette méthode est couramment utilisée dans la littérature, par exemple par [Sun \(2007\)](#) ou [Candan et Yazgan \(2015\)](#). Le logiciel Minitab 19 a été utilisé pour appliquer la méthode Taguchi à notre algorithme génétique sur 8 instances réelles de notre problème. Cinq paramètres sont testés :

- Population : la taille de la population
- Generation : le nombre de générations avec la meilleure solution identique avant arrêt

- Mutation : la probabilité de mutation
- Best : la proportion des meilleurs individus reportés à la génération suivante

La probabilité de sélection pour chaque individu n'est pas paramétrée à l'aide de la méthode de Taguchi car elle se calcule par rapport à la valeur d'évaluation de l'individu.

La figure 4.22 permet de choisir les meilleurs paramètres de configuration inscrits dans la table 4.5.

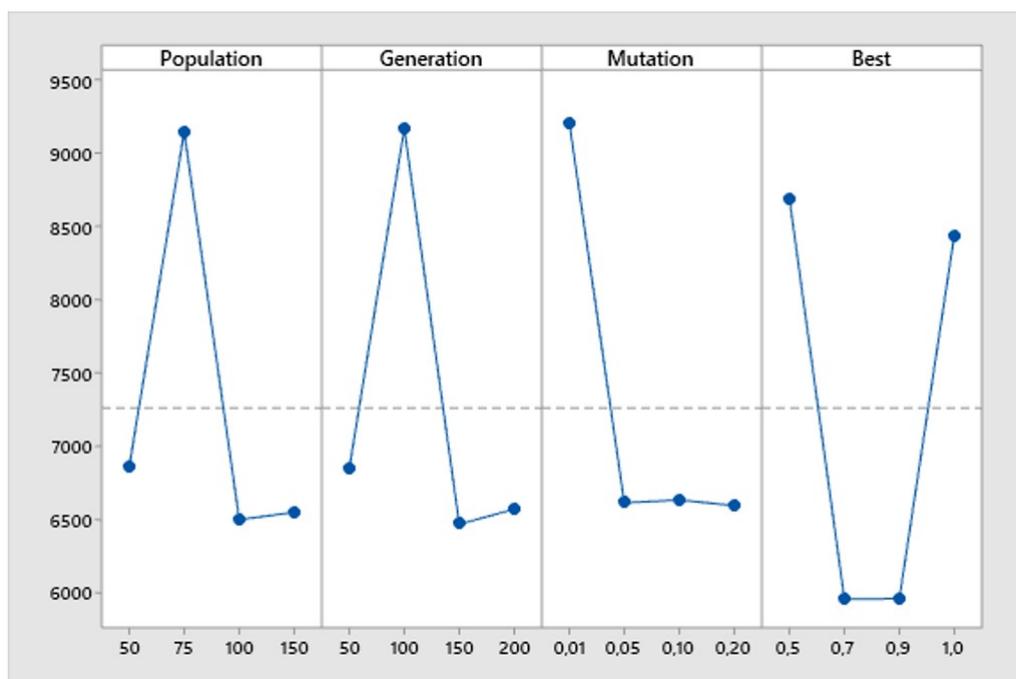


FIGURE 4.22 – Méthode Taguchi - résultats des paramètres

Population	Generation	Mutation	Best
100	150	0.05	0.9

TABLEAU 4.5 – Paramètres de l'algorithme génétique

Comme cela est expliqué dans la section 4.4.2, six opérateurs de croisement différents ont été développés pour cette étude. Utiliser autant d'opérateurs différents n'est pas commun. L'effet de chaque opérateur sur le résultat de l'AG a été analysé. La méthode de Taguchi a été appliquée en utilisant le logiciel Ellistat sur 8

instances différentes de cas réel. La figure 4.23 montre l'effet de chaque croisement sur les résultats de l'AG. Ce graphique montre que chaque opérateur a un effet important et bénéfique sur l'objectif de minimisation de la fonction objectif. A partir de cette analyse, les six opérateurs de croisement ont été sélectionnés pour être appliqués dans l'AG et obtenir la meilleure valeur de c_{max} possible.

Dans le même objectif, l'effet des quatre opérateurs de mutation a été testé sur la fonction objectif. Le résultat est donné par la figure 4.24. Cette analyse montre que seul l'opérateur de mutation 1 (mutation par échanges) a un effet minimisant sur la fonction objectif. C'est pourquoi, il a été décidé de n'utiliser que cet opérateur de mutation dans l'AG.

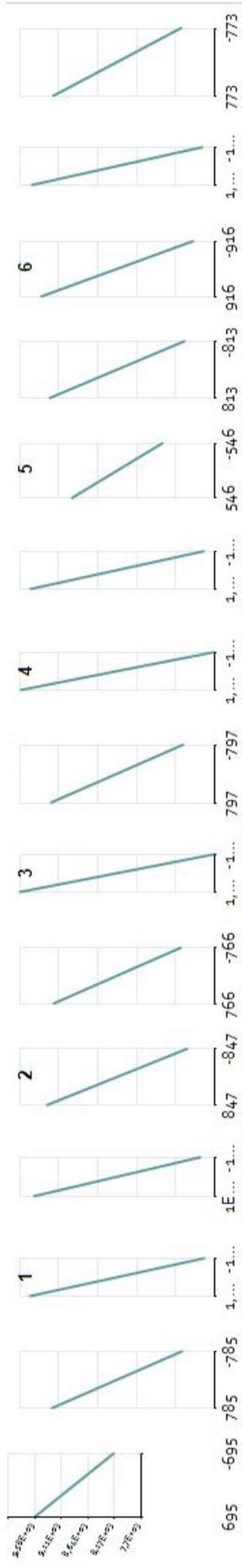


FIGURE 4.23 – Méthode Taguchi - analyse de l'impact des différents opérateurs de croisement

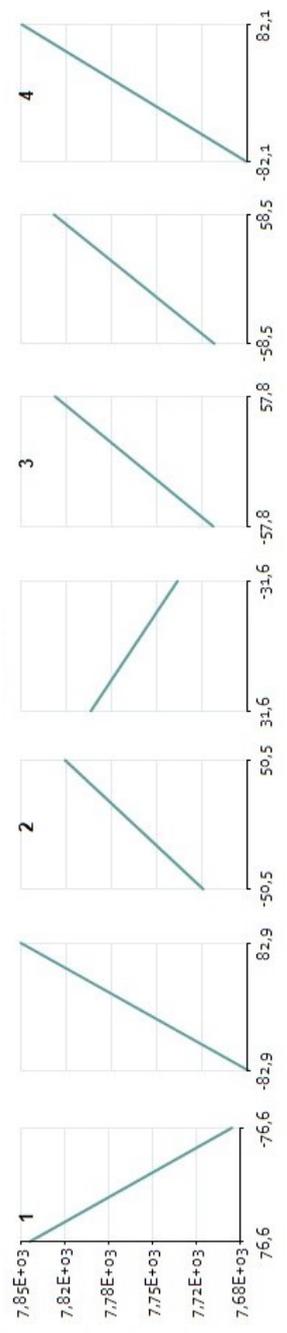


FIGURE 4.24 – Méthode de Taguchi - analyse de l'impact des différents opérateurs de mutation

4.5.3 Comparaison du modèle mathématique et du GA

La table 4.6 donne, pour chaque groupe de 10 instances :

- Données :
 - Colonne "M" : nombre de machines
 - Colonne "N" : nombre de tâches
 - Colonne "P" : interval de génération des temps de production
 - Colonne "[A-B]" : Paramètres A et B de contrôle de la génération des temps de changement
- Résultats :
 - Colonne "Gap Cplex (%)" : écart moyen par rapport à la valeur optimale en pourcentage obtenu par Cplex après un temps d'exécution maximum de 3600 secondes. Cplex calcule cet écart à partir d'une borne inférieure.
 - Colonne "CPU Cplex (s)" : temps moyen d'exécution par Cplex en secondes.
 - Colonne "Gap AG (%)" : écart moyen entre la meilleure solution trouvée pas Cplex et la solution de l'AG en pourcentage.
 - Colonne "CPU AG (s)" : temps moyen d'exécution de l'AG en secondes.

Le tableau montre que pour les cas de petite taille, le modèle est capable de trouver la solution optimale. L'algorithme trouve la même solution avec un temps de calcul plus court. Par exemple, pour les instances avec 3 machines, 8 tâches, des temps de production générés entre 1 et 9 unités de temps et des paramètres A et B valant 0.05 et 0.1, CPLEX trouve les solutions optimales avec un temps d'exécution moyen de 463.9 secondes. Pour ce groupe d'instances, l'AG est capable de trouver la même valeur de solution optimale en 7.9 secondes en moyenne. Cela représente une amélioration du temps nécessaire pour trouver la solution optimale de 89%.

Pour les instances avec plus de tâches ou des temps de production plus importants, le modèle mathématique n'atteint pas la solution optimale dans la limite de temps d'une heure (3600 secondes). Cependant, l'algorithme trouve une meilleure solution avec un temps de calcul plus court. Par exemple, pour les instances avec 3 machines, 15 tâches, un temps de production généré entre 1 et 9 et des paramètres A et B définis à 0.05 et 0.1, CPLEX n'atteint pas la solution optimale dans la limite de temps des 3600 secondes. Sur ces mêmes instances, l'AG améliore la solution trouvée de 49% en moyenne par rapport aux meilleures solutions identifiées par CPLEX dans un temps d'exécution de 7.6 secondes.

Sur l'analyse des écarts types associés aux moyennes, pour les écarts de résultats ("Gap Cplex" et "Gap AG"), les écarts types sont très faibles. Il peut être

DONNÉES				RÉSULTATS			
M	N	P	[A-B]	Gap Cplex (%)	CPU Cplex (s)	Gap GA (%)	CPU GA (s)
3	8	[1-9]	[0.01-0.1]	0.0 ± 0.0	206 ± 147	0 ± 0	8.2 ± 1.1
			[0.05-0.1]	0.0 ± 0.0	464 ± 576	0 ± 0	7.9 ± 0.7
			[0.1-0.2]	0.0 ± 0.0	88 ± 73	0 ± 0	7.3 ± 1.1
			[0.1-0.5]	0.0 ± 0.0	279 ± 446	0 ± 0	7.1 ± 0.7
			[0.2-0.5]	0.0 ± 0.0	509 ± 615	0 ± 0	7.6 ± 1.3
	[1-99]	[0.01-0.1]	52.9 ± 0.2	3600 ± 0	-27 ± 0.3	4.0 ± 0.7	
		[0.05-0.1]	49.6 ± 0.3	3600 ± 0	-29 ± 0.4	4.0 ± 0.5	
		[0.1-0.2]	54.5 ± 0.1	3600 ± 0	-19 ± 0.2	4.2 ± 0.3	
		[0.1-0.5]	67.8 ± 0.1	3600 ± 0	-39 ± 0.3	4.6 ± 0.8	
		[0.2-0.5]	58.9 ± 0.2	3600 ± 0	-20 ± 0.1	4.2 ± 0.5	
15	[1-9]	[0.01-0.1]	73.2 ± 0.1	3600 ± 0	-51 ± 0.2	9.3 ± 2.5	
		[0.05-0.1]	68.6 ± 0.2	3600 ± 0	-49 ± 0.2	7.6 ± 1.5	
		[0.1-0.2]	72.3 ± 0.1	3600 ± 0	-50 ± 0.1	8.2 ± 1.4	
		[0.1-0.5]	70.3 ± 0.3	3600 ± 0	-57 ± 0.3	8.9 ± 2.0	
		[0.2-0.5]	68.4 ± 0.3	3600 ± 0	-52 ± 0.3	8.5 ± 1.2	

TABLEAU 4.6 – Comparaison des résultats entre Cplex-ILOG et l'AG

conclu que les écarts sont très proches entre les instances des différents groupes. Cela reflète la stabilité de l'algorithme. Le nombre d'instances résolues de manière optimale diminue en fonction de l'augmentation de la complexité. La limite de temps sur CPLEX est alors atteinte pour toutes les instances des groupes les plus complexes. C'est pourquoi, l'AG a été choisi pour être implémenté dans l'outil d'aide à la décision qui sera utilisé chez Petit Bateau pour résoudre les cas réels de l'industriel. A partir de la table 4.6, la bonne performance de l'algorithme peut être validée et l'algorithme peut être utilisé pour résoudre des cas industriels réels.

4.6 Campagne de tests numériques - cas réels

La méthode de résolution avec l'AG a été implantée dans l'usine de Petit Bateau. Toute cette étude a été réalisée dans ce but avec pour objectif final de développer une application utilisable dans l'atelier de tricotage de l'usine. Le projet de développement du logiciel est détaillé dans le chapitre 6. Dans cette section, nous donnons le contexte d'application pour le cas réel et les résultats obtenus. Pour des raisons confidentielles, aucune unité de mesure ne sera donnée dans cette section.

4.6.1 Présentation du système réel

L'industrie textile et en particulier l'étape de tricotage ont des contraintes très spécifiques. Basée sur des procédés de la fin du 19^{ième} siècle, l'innovation à travers le temps leur a permis de surmonter les différentes crises de cette industrie en France. Cela requiert la maîtrise des techniques et de l'expertise dans le métier. Aujourd'hui, de nouveaux défis sont présents. Le challenge d'aujourd'hui est d'être capable de répondre rapidement aux changements du marché en faisant preuve d'agilité et de flexibilité. C'est pourquoi, l'utilisation d'un outil d'aide à la décision est très important et bénéfique pour le manager de production. Un bon ordonnancement est le prérequis pour répondre à la demande client avec le bon produit au bon moment.

La complexité de ce problème d'ordonnancement vient de plusieurs facteurs. Le parc de machines est composé d'une grande variété de machines. Ce sont toutes des machines à tricoter circulaires mais avec des caractéristiques et des capacités très spécifiques et différentes les unes des autres. Certaines sont très anciennes et présentes dans l'usine depuis sa création. Elles fonctionnent entièrement de manière mécanique et font des produits qui requièrent peu de technique. Elles vont par exemple être utilisées pour faire des tissus basiques qui vont servir pour faire des tee-shirts. D'autres sont plus complexes mais reposent toujours entièrement sur de la mécanique dans leur fonctionnement. En revanche, les machines les plus récentes sont électroniques. Elles sont équipées de technologies capables de tricoter n'importe quel motif avec un grand nombre de fils de couleurs différentes. Par exemple, une photo peut être totalement reproduite en tricotage. La figure 4.25 est la reproduction d'une affiche de pub Petit Bateau en tricot. Auparavant, seule la répétition d'un motif était possible.

Les différentes instances utilisées pour évaluer la performance de la méthode sur le cas réel sont des données de production réelles de la fin de l'année 2019 et du début de 2020. Le nombre de tâches à ordonnancer selon les semaines varie entre 83 et 126 tâches. Les temps de production et les temps de changement sont très diversifiés dans l'ensemble des données. Par exemple, si deux produits se suivent et ont des caractéristiques techniques proches, seulement 15 minutes de réglage peuvent être nécessaires. Au contraire, si la machine n'est pas du tout réglée pour ce type de caractéristiques, plus de 5 heures de réglage peuvent avoir lieu. La machine peut être totalement désassemblée pour changer le motif que les aiguilles vont suivre. L'optimisation de l'ordonnancement est très importante pour Petit Bateau pour choisir les machines les plus adaptées à chaque tâche en fonction de l'ensemble de la production qui doit être réalisée.



FIGURE 4.25 – Exemple d'une affiche reproduite en tricotage

Nombre moyen de tâches (N)	102
Nombre moyen de produits différents	33
Nombre de machines (M)	49
Nombre de zones (W)	6
Nombre moyen de machines capables de tourner en simultané dans une zone (U)	5
Nombre moyen de machines capables de tourner en simultané dans l'ensemble de l'atelier	25
Nombre de régleurs	5
Nombre moyen de machines capable de produire chaque tâche	3.5
Temps de production moyen	1507 ± 564
Temps de changement moyen	199 ± 138

TABLEAU 4.7 – Caractéristiques des données réelles

Au delà des contraintes techniques, des contraintes humaines sont très importantes à considérer depuis ces dernières années. Un opérateur peut surveiller et s'occuper de maximum 5 machines à la fois. Toutes les machines de l'atelier ne sont donc pas en capacité de tourner en même temps. Une rotation entre les machines est alors nécessaire pour assurer la production de tous les tissus demandés en respectant la diversité.

Pour finir, les changements nécessaires entre deux productions sont réalisés par une équipe spécifique car ce sont des compétences différentes que celles des opérateurs. Les changements doivent donc être positionnés au bon moment dans le planning de production pour ne pas perturber la performance de l'atelier.

Les caractéristiques des données d'une instance de production sont fortement liées au nombre de ressources humaines disponibles. L'atelier travaille en 3 équipes de 5 opérateurs (matin, après-midi et nuit) sur 5 jours. Le nombre de régleurs capable de faire les changement est limité. Aucun régleur ne travaille la nuit. L'équipe de 5 régleurs est répartie en journée, le matin ou l'après-midi. Le nombre de machines capables de tourner en simultané est limité à 25 quand l'ensemble du personnel est présent sur une équipe.

Le plan d'implantation des machines est donné en figure 4.26. Les différentes zones sont représentées par les couleurs et plus de 5 machines sont présentes dans chacune. Un opérateur est affecté à une zone définie et il y a 6 zones. 30 machines devraient pouvoir fonctionner en même temps mais dû au nombre limité d'opérateur (5 par équipe), seulement 25 machines peuvent être en marche au même moment. Cela impacte fortement le résultat de l'ordonnancement sur les choix d'affectation et de planification qui vont être faits. Pour expliquer la diversité des

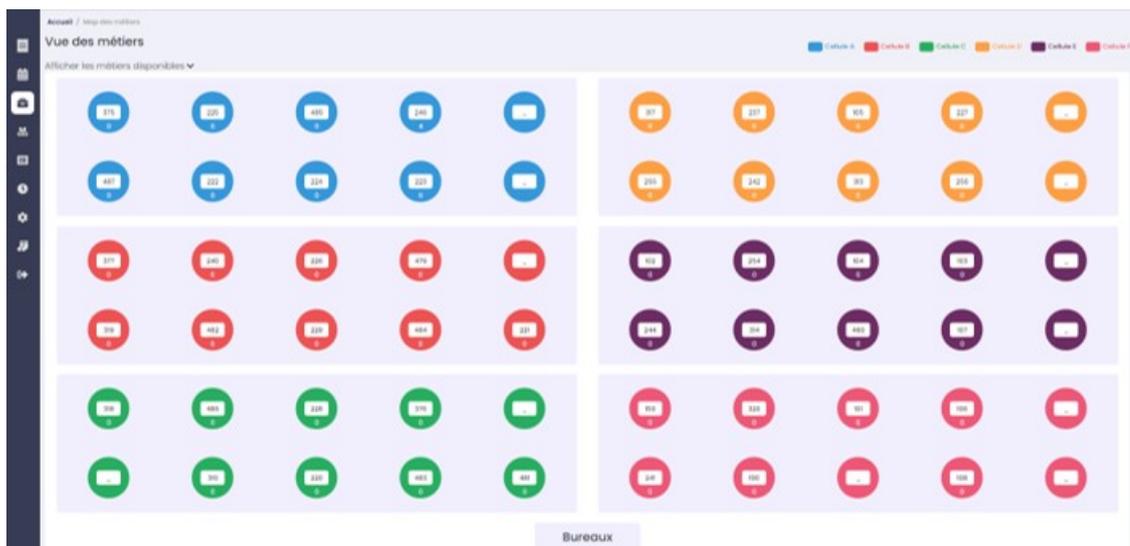


FIGURE 4.26 – Plan d'implantation des machines dans l'atelier de tricotage

données réelles, quelques caractéristiques réelles sont présentées dans le tableau 4.7. Les caractéristiques moyennes des différentes données y sont reportés. Les données dépendantes de la configuration de l'atelier sont identiques pour chaque instance (nombre de machines, nombre de zones...). Les écart-types des temps de production et des temps de changement sont indiqués pour montrer la large diversité autour de laquelle ils ont été générés.

Pour résumer, le problème d'ordonnancement appliqué au cas réel doit prendre en compte une très large diversité de produits, de machines, de temps de production et de changement mais également des contraintes de ressources humaines. Avec l'AG développé, l'aide apportée par l'outil d'ordonnancement sera très utile au manager de l'atelier et lui permettra de gagner en temps et en performance sur cette tâche hebdomadaire.

4.6.2 Résultats des instances réelles

Les résultats de 11 instances réelles représentatives sont présentés dans la table 4.8. Considérons la première instance. Cette instance est composée de 106 tâches à ordonnancer sur 49 machines disponibles. La date de fin maximum réalisée dans la réalité a été de 6.33 unités de temps. L'utilisation de l'AG, avec des contraintes de ressources identiques à ce qui s'est passé dans la réalité, permet d'atteindre une date de fin théorique de 4.61 unités de temps. Cela représente une amélioration de

DONNEES				RESULTATS		
Numéro d'instance	Nombre de machines	Nombre de tâches	Valeur réelle c_{max}	GA c_{max}	GAP (%)	CPU (s)
1	49	106	6.33	4.61	-28%	315
2	49	112	6.67	5.67	-15%	651
3	49	83	8.02	4.43	-45%	305
4	49	105	9.19	4.70	-49%	439
5	49	94	6.33	5.33	-15%	720
6	49	94	8.33	5.87	-30%	443
7	49	105	6.33	5.45	-14%	515
8	49	109	7.33	5.98	-18%	543
9	49	95	8.33	5.86	-30%	241
10	49	103	7.33	6.67	-9%	325
11	49	126	10.00	7.06	-29%	526

TABLEAU 4.8 – Résultats obtenus sur les instances réelles

28%. Une comparaison entre la date de fin maximum obtenue dans la réalité et celle obtenue par l'AG avec les mêmes données pour les 11 instances étudiées est illustrée par le graphique de la figure 4.27.

Le graphique de la figure 4.28 montre l'évolution des valeurs de c_{max} réel et obtenu avec l'AG en fonction des quantités à produire. Une analyse similaire en figure 4.29 montre la variation des dates de fin en fonction du nombre de tâches à ordonnancer. Sur les mêmes jeux de données, l'AG améliore la date de fin maximum sur toutes les instances quelque soit la quantité ou le nombre de tâches à réaliser.

En utilisant l'algorithme, le manager de l'atelier pourra ordonnancer l'ensemble de la production avec un gain de temps estimé à 67% par rapport au temps qu'il passe à réaliser cette tâche actuellement. Une vraie amélioration sur l'objectif de terminer l'ensemble des tâches le plus tôt possible grâce à l'algorithme est prouvée comparé à ce qui a été réalisé sur le même horizon.

L'objectif final d'utiliser l'AG est de permettre le réordonnancement de la production pendant l'exécution du planning de base en fonction d'arrivée d'aléas. Par exemple, quand une tâche est ajoutée ou annulée pendant l'horizon ou quand un imprévu arrive. Il s'agit d'un outil puissant pour accompagner l'usine dans une transition vers une industrie 4.0. Cela sera développé dans le chapitre suivant 5. Il sera également possible grâce à cet outil de simuler différents scénarios avec des ajustements de ressources pour permettre le choix du meilleur planning de production sur l'horizon de temps selon les besoins du responsable de l'atelier.

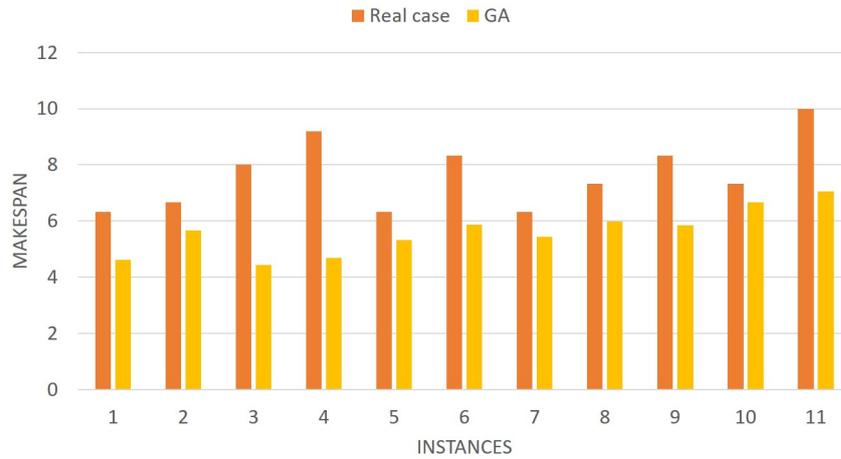


FIGURE 4.27 – Comparaison du c_{max} réel et c_{max} de l'AG sur les 11 instances

4.7 Conclusion

Ce chapitre traite d'un problème d'ordonnancement de machines parallèles avec des temps de changement qui dépendent des machines et de l'ordre de la séquence. Deux autres caractéristiques sont prises en considération : l'éligibilité des machines à réaliser certaines tâches et deux types de ressources limitées. L'objectif étudié est la minimisation de la date de fin maximum. Choisir de traiter ce problème est directement motivé par les besoins de l'entreprise Petit Bateau dans laquelle se déroule cette thèse. L'entreprise industrielle fait face à des changements de tendance rapides du marché et à besoin d'adapter sont outils de production. Le révolution vers l'industrie 4.0 est de plus en plus importante comme dans beaucoup d'industries pour conserver les sites de production français en mettant en avant une expertise et un savoir-faire spécifique. L'état de l'art sur ce type de problèmes montre qu'il n'a jamais été traité dans le même cadre que celui-ci. Un modèle de résolution est proposé pour prendre en compte toutes les caractéristiques de la réalité du terrain. Dans l'objectif de résoudre les instances réelles avec un nombre important de données un algorithme génétique a été développé. Les deux méthodes de résolution et le détail de l'algorithme génétique ont été expliqués dans ce chapitre.

Les deux méthodes de résolution sont comparées sur des instances de petites tailles. Cette étude a permis de confirmer que l'AG développé peut être utilisé pour résoudre les instances réelles. Les résultats sur les instances réelles sont ensuite exposés avec une amélioration de l'objectif c_{max} sur l'ensemble des tests comparé aux résultats de production réels.

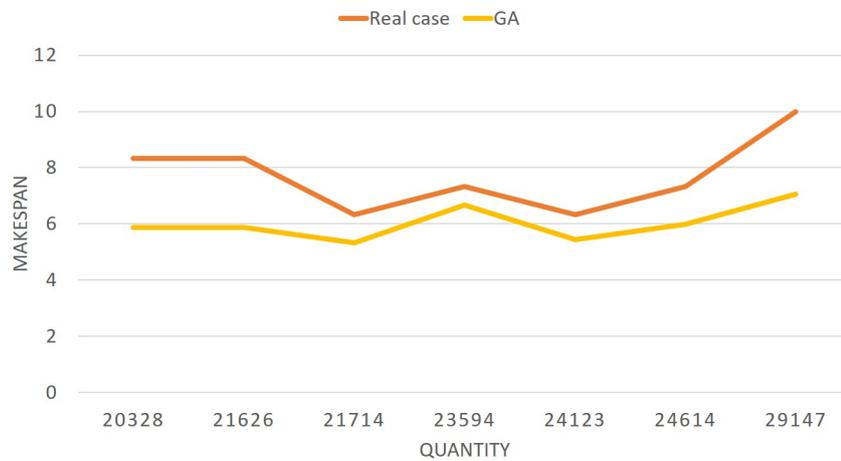


FIGURE 4.28 – Comparaison du c_{max} réel et du c_{max} de l'AG en fonction de la quantité de production



FIGURE 4.29 – Comparaison du c_{max} réel et du c_{max} de l'AG en fonction du nombre de tâches

Chapitre 5

Problème de réordonnancement

Sommaire

5.1	Description du problème	122
5.2	État de l'art	123
5.3	Méthode de résolution	125
5.4	Campagne de tests numériques	131
5.5	Conclusion	136

Résumé

Dans ce chapitre, nous allons aborder le problème de réordonnancement à la suite du travail fait sur l'ordonnancement de l'atelier de tricotage. Les contraintes prises en compte sont similaires à celles du problème d'ordonnancement : les temps de changement dépendant de la séquence et des machines ainsi que les ressources limitées. Plusieurs perturbations peuvent mener à un réordonnancement. Cette étude s'intéresse à l'optimisation d'un objectif par combinaison linéaire et prend en compte la performance d'une solution mais également sa stabilité par rapport à un ordonnancement initial.

Publications

A. Berthier, H. Chehade, A. Yalaoui, C. Bouillot, L. Amodeo, F. Yalaoui, An unrelated parallel machines rescheduling problem : an industrial case study, in : IFIP International Conference on Advances in Production Management Systems (APMS 2021), 5-9 Sep 2021, NANTES, France, 2021.

A. Berthier, A. Yalaoui, H. Chehade, F. Yalaoui, L. Amodeo, C. Bouillot, Rescheduling in textile industry : an unrelated parallel machines problem with setup times, Ola21 - Italy (2021).

5.1 Description du problème

L'objectif de ce chapitre est de proposer à Petit Bateau une méthode pour adapter quand un aléa se produit, le planning de production. L'enjeu est d'impacter le minimum l'organisation de l'atelier tout en maintenant les performances au plus proche du prévisionnel. L'atelier considéré ici est une nouvelle fois l'atelier de tricotage composé de machines parallèles non reliées. Les temps de changement sont toujours pris en compte. Ils dépendent de la séquence de production et des machines d'affectation. Comme pour l'ordonnement, nous devons tenir compte des ressources de l'atelier qui sont en nombre limité. Le nombre de machines pouvant fonctionner en même temps est limité par le nombre d'opérateurs et le nombre de régleurs pouvant faire les changements l'est également. Un régleur ne peut effectuer qu'un changement à la fois. L'objectif de l'étude est de réordonner un nombre connu de tâches après l'apparition d'une perturbation.

Un planning de production est initialement généré par l'algorithme génétique d'ordonnement qui minimise le c_{max} (voir chapitre 4). En moyenne, une semaine de production prévoit 48 ordres de fabrication et 22 tonnes de production. Envisager de suivre à l'identique le planning prévu est utopiste. Au cours d'une semaine, de nombreux aléas peuvent survenir et décaler le planning initial. La suite du planning devient donc caduque. Quatre perturbations possibles sont considérées ici et représentent les cas les plus fréquents dans l'atelier :

- Arrivée d'une tâche supplémentaire : il existe une grande disparité sur la survenue de cet aléa en fonction des semaines. Aucune tâche ne peut être ajoutée sur une semaine tandis que sur d'autres semaines, il peut y en avoir jusqu'à 15 (+31% d'ordres).
- Annulation d'une tâche : peu d'annulations se produisent, en général ce qui est demandé est produit parfois générant du retard ou du stock incurant. Il faut tout de même l'anticiper puisque ça peut tout de même arriver. En 2021, 5 tâches ont par exemple été annulées sur une semaine cela représente 10% des ordres demandés.
- Défaillance d'une machine : le taux de pannes machine est très faible dans l'atelier (2 fois par an). Cependant, lorsqu'une machine est arrêtée, elle peut perturber l'atelier pendant plusieurs semaines, jusqu'à 6 semaines. En effet, un technicien doit venir étudier la panne puis il faut éventuellement commander les pièces à changer et enfin effectuer le changement à nouveau avec un technicien spécialisé.
- Absence d'une ressource humaine (opérateur ou régleur) : le taux d'absence est de 15% pour l'atelier tricotage.

L'objectif de cette méthode de réordonnancement est de trouver la meilleure solution possible, c'est-à-dire une solution qui termine l'ensemble des tâches le plus tôt possible en gardant une stabilité par rapport au planning initial. Pour cela, il faut prendre en compte l'état d'avancement de la production. C'est pourquoi, l'objectif de cette étude est la maximisation de la performance par la minimisation du c_{max} tout en évaluant et maintenant un niveau de stabilité. Cela va également dans le sens de Petit Bateau d'accompagner son usine vers une usine 4.0 et une modernisation des outils de travail.

5.2 État de l'art

Dans la littérature, les deux seuls travaux sur un système de production similaire au nôtre sont ceux présentés dans cette thèse aux chapitres 3 et 4. En effet, ils traitent dans le même contexte d'atelier, respectivement d'un problème d'agencement et d'ordonnancement. Ils ont fait l'objet de deux publications ([Berthier et al. \(2019\)](#) et [Berthier et al. \(2021c\)](#)).

Dans la réalité d'un contexte industriel d'ordonnancement, le système est dynamique et doit savoir répondre à l'arrivée d'évènements extérieurs ([Framinan et Ruiz \(2010\)](#)). Différentes approches de réordonnancement sont proposées dans la littérature.

La première consiste à utiliser une méthode d'ordonnancement standard avec les nouvelles données suite à la perturbation. Cela peut permettre une bonne qualité de solution sur l'objectif de performance. Cependant, la stabilité n'est pas garantie ([Mohan et al. \(2019\)](#)). Dans la réalité, obtenir une solution totalement différente de l'ordonnancement initial n'est pas favorable à une bonne organisation d'atelier et à son management.

La seconde consiste à réaliser un ordonnancement pro-actif. Celui-ci génère un planning en insérant des temps d'inactivité entre les tâches pour absorber les perturbations tout en maintenant la qualité de l'ordonnancement ([Arnaout \(2014\)](#)). Une approche stochastique est un autre moyen d'anticiper les éventuels perturbations ([Ruszczyński et Shapiro \(2003\)](#)).

Le dernier type de méthode est l'ordonnancement réactif, connu sous le nom de réordonnancement. Il s'agit de modifier le planning existant en cours d'exécution pour l'adapter aux changements. [Kim et Kim \(2020\)](#) ont récemment étudié un problème de réordonnancement de machines parallèles non reliées avec des temps de changement dépendant de la séquence sous prévisions de pannes de machines. Voici une synthèse des auteurs qui traitent des problèmes similaires dans la littérature. Tout d'abord, la prise en compte d'aléa existe sur d'autres types de problèmes que des problèmes d'ordonnancement. Par exemple, [Hasani Goodarzi et al. \(2021\)](#) les considère sur un problème de cross-docking. Sur des problèmes d'ordonnancement

ment, [Yin et al. \(2011\)](#) considèrent un système flowshop hybride avec des perturbations aléatoires et développent puis implémentent une heuristique sur un logiciel donné. [Sun et al. \(2015\)](#) s'intéressent au processus de coulée en continue d'acier avec des tâches de durée incertaine. La méthode de décomposition Lagrangienne est développée. [Zhang et Wong \(2017\)](#) considèrent un système jobshop flexible avec réordonnement partiel et total pour faire face à des tâches urgentes, des annulations ou des défaillances de machines. Pour finir, [Baykasoğlu et Karaslan \(2017\)](#) se situent dans un environnement jobshop dynamique avec nouvelles tâches, urgences, annulation, changements de date de fin attendue et défaillances machine. Le déclenchement d'un réordonnement dépend de l'arrivée des événements et la méthode de résolution considère différents critères dans l'ordre lexicographique. Dans une majorité d'études, contrairement aux problèmes d'ordonnement mono-objectif classiques, la complexité vient de la combinaison de deux objectifs opposés. Les problèmes de réordonnement doivent prendre en considération une mesure de performance et une mesure de stabilité. De multiples indicateurs sont proposés dans la littérature. La qualité d'appropriation aux contextes des mesures de performances (définition et utilisation) sont cruciales. Actuellement, il existe de nombreuses métriques proposées par [Jiang et al. \(2014\)](#) qui peuvent être classées en deux catégories :

- Unitaire : attribution à chaque ensemble non dominé un nombre reflétant un certain aspect de qualité
- Binaire : attribution d'un nombre à une paire d'approximations de Pareto

Cependant, chaque industrie a ses propres caractéristiques qui impliquent des indicateurs spécifiques. Par exemple, la stabilité peut être évaluée par le nombre de tâches effectuées sur une machine différente de celle du planning initial après réordonnement ([Azizoglu et Alagöz \(2005\)](#)). D'autres approches peuvent définir la stabilité en terme de déviation de date de début des tâches entre le planning original et celui revu. La stabilité peut aussi être évaluée par les différences dans la séquence des tâches générées ([Pfeiffer et al. \(2006\)](#) et [Liu et al. \(2018\)](#)). Le déclenchement du réordonnement peut se faire selon plusieurs politiques différentes. Certaines études choisissent de réordonner dès qu'un événement se produit. Ce sont des réordonnements *event-driven*. Cela peut impliquer de choisir un certain niveau de tolérance comme dans l'étude de [Rossit et al. \(2019\)](#). Les auteurs [Ma et al. \(2018\)](#) réordonnent quand un critère n'est plus satisfait en utilisant une heuristique de décalage vers la droite.

5.3 Méthode de résolution

La contribution de ce chapitre est d'explorer plusieurs indicateurs d'évaluation d'une solution suite à un réordonnancement. Dans la méthode appliquée, en premier lieu, des instances sont générées aléatoirement et ordonnancées à l'aide de l'algorithme génétique du chapitre 4. L'algorithme minimise le makespan donc la date de fin maximale de l'ensemble des tâches. L'ensemble de la production doit finir le plus tôt possible sans priorité sur l'horizon de temps. Des perturbations sont ensuite générées. Le nouveau problème est de réordonnancer en tenant compte des deux objectifs conflictuels : conserver un niveau de performance et garantir une stabilité. Le flowchart ci-dessous présente l'approche mise en place (Figure 5.1).

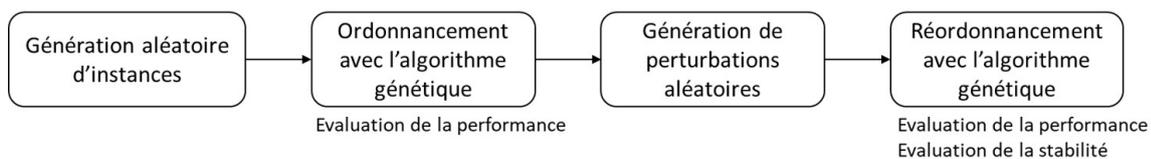


FIGURE 5.1 – Flowchart de la méthode de résolution du réordonnancement

Cette étude se concentre sur la mesure du nombre de changement d'affectation machine pour chaque tâche entre l'ordonnancement initial et le planning suite au réordonnancement. Pour illustrer cela, un exemple est donné. Cet exemple ne tient pas compte de la limite sur l'utilisation des ressources humaines. Dans un premier temps l'exemple se compose de 6 tâches et 3 machines. Une indisponibilité machine va être illustrée. Puis dans un second temps, l'arrivée d'une nouvelle tâche, la tâche 7 va venir perturber l'ordonnancement pour illustrer l'impact d'un réordonnancement. Dans cet exemple, un autre critère de mesure est présenté pour représenter l'impact que les aléas peuvent avoir dessus. Il s'agit de l'écart entre la date de fin initiale de chaque tâche et la date de fin après réordonnancement. Le tableau 5.1 donne les temps de production p_{mi} pour chaque machine $m = (1...M)$ pour chaque tâche $i = (1...N)$ par unité et la quantité de chaque tâche est donnée dans la dernière ligne du tableau. Le tableau 5.2 donne les temps de changement entre les tâches $i = (0...N)$ et $j = (1...N)$ sur les machines 1, 2 et 3. La figure 5.2 montre le résultat de l'ordonnancement de l'exemple sous forme de gantt. La valeur de c_{max} atteinte est de 29 unités. A présent, supposons que la machine 2, M2, devienne indisponible entre les instants 7 et 37. Si la fin de la tâche 4 et celle de la tâche 5 sont décalées après la perturbation, la valeur de c_{max} augmente à 54 mais la mesure de stabilité est égale à 0 : il n'y a pas de changement de machine et la production se poursuit comme initialement prévue uniquement avec un décalage dans le temps (figure 5.3). L'indicateur sur l'écart de fin des tâches s'évalue à 60 :

la tâche 4 termine à l'instant 43 plutôt que 13 et la tâche 5 à l'instant 54 plutôt que 24. Maintenant, si l'affectation des tâches aux machines change comme sur la figure 5.4, l'indicateur de stabilité est dégradé à 2. Cependant, la mesure de performance c_{max} diminue à 42 et l'indicateur sur les dates de fin à 43.

Supposons maintenant qu'une nouvelle tâche 7 se présente en cours de production avec les caractéristiques des tableaux 5.1 et 5.2. Si la tâche est affectée à la suite de la machine terminant le plus tôt (M2), le c_{max} augmente à 34. En revanche, les indicateurs de stabilité sont nuls, aucune tâche n'a été affectée à une autre machine et aucune tâche n'a été impactée sur sa date de fin (figure 5.5). Si à présent, pour réduire les temps de changement, il est décidé d'insérer la nouvelle tâche 7 entre les tâche 1 et 2 sur la machine M3, le c_{max} est stable à 34. A nouveau, aucun impact n'a lieu sur l'affectation des tâches aux machines donc l'indicateur de changement d'affectation vaut 0. En revanche, cela décale la date de fin de la tâche 2 : l'indicateur sur la date de fin des tâches vaut alors 5 (figure 5.6).

Selon les directives de l'entreprise, il a été décidé de n'utiliser comme indicateur de stabilité que le nombre de changement d'affectation. En effet, cela mesure une perturbation dans l'organisation de l'atelier puisqu'il faut modifier le plan de production prévu et le travail demandé aux opérateurs. En revanche, le décalage d'une date de fin n'a pas d'impact si celle ci ne termine pas au delà de la semaine prévue. Si un retard est généré, il ressortira d'avantage dans l'indicateur du makespan qui mesure la performance de l'atelier.

L'indicateur de stabilité est exploré dans différentes combinaisons et analysé dans l'objectif d'obtenir le planning réordonnancé le plus pertinent et efficace pour l'entreprise. Cet indicateur peut être comparé à un paramètre limite. Si la limite est franchie, la fonction objectif est pénalisée. Cela permet un niveau de tolérance et joue sur l'objectif de performance.

p_{mi}	1	2	3	4	5	6	7
M1	6	3	5	4	7	5	3
M2	4	4	9	3	5	4	3
M3	5	2	7	4	6	6	3
Quantité	3	5	2	4	2	3	2

TABLEAU 5.1 – Temps de production p_{mi}

5.3. Méthode de résolution

s_{1ij}	1	2	3	4	5	6	7	s_{2ij}	1	2	3	4	5	6	7	s_{3ij}	1	2	3	4	5	6	7
0	1	3	2	2	4	1	1	0	3	4	2	1	3	3	1	0	1	2	3	4	5	2	1
1	0	1	2	4	3	1	1	1	0	2	3	3	4	4	1	1	0	3	5	1	1	3	1
2	1	0	4	4	1	4	1	2	2	0	1	1	4	2	1	2	4	0	3	1	1	1	1
3	2	4	0	3	3	3	1	3	4	3	0	4	3	4	1	3	2	1	0	2	2	1	1
4	3	2	4	0	1	2	1	4	4	4	2	0	1	1	1	4	1	2	3	0	2	2	1
5	4	4	3	3	0	4	1	5	1	2	4	3	0	4	1	5	1	1	1	2	0	1	1
6	4	1	1	2	1	0	1	6	2	3	2	3	2	0	1	6	1	2	2	1	3	0	1
7	1	1	1	1	1	1	0	7	1	1	1	1	1	1	0	7	1	1	1	1	1	1	0

TABLEAU 5.2 – Temps de changement s_{mij}

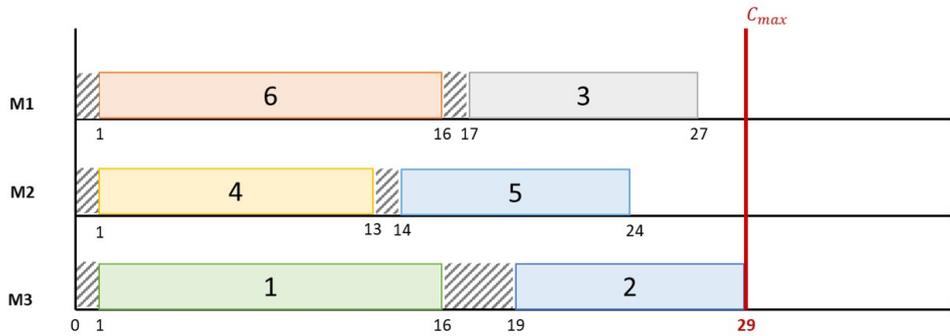


FIGURE 5.2 – Ordonnancement initial de l'exemple

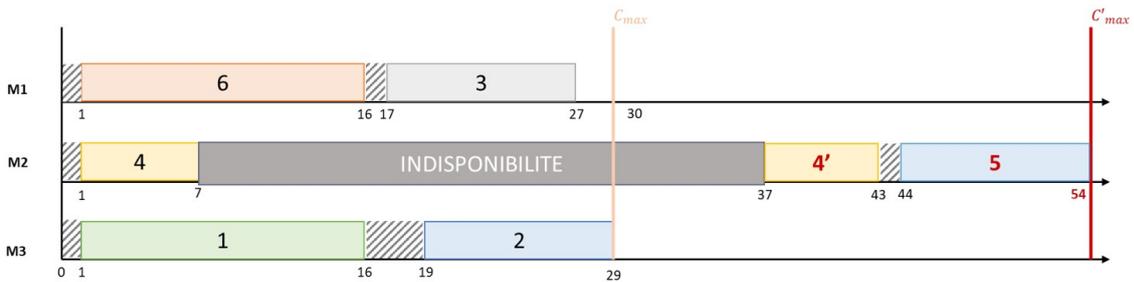


FIGURE 5.3 – Réordonnancement de l'exemple après une indisponibilité machine avec l'indicateur de stabilité égal à 0 et celui des dates de fin à 60

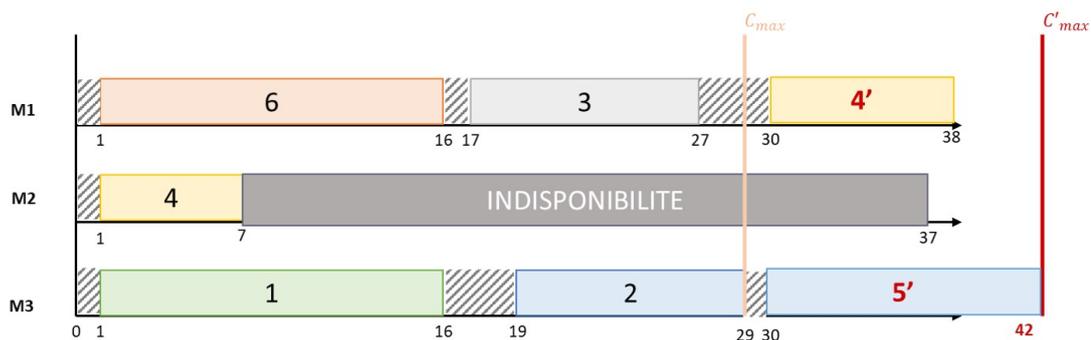


FIGURE 5.4 – Réordonnement de l'exemple après une indisponibilité machine avec l'indicateur de stabilité égal à 2 et celui des dates de fin à 43

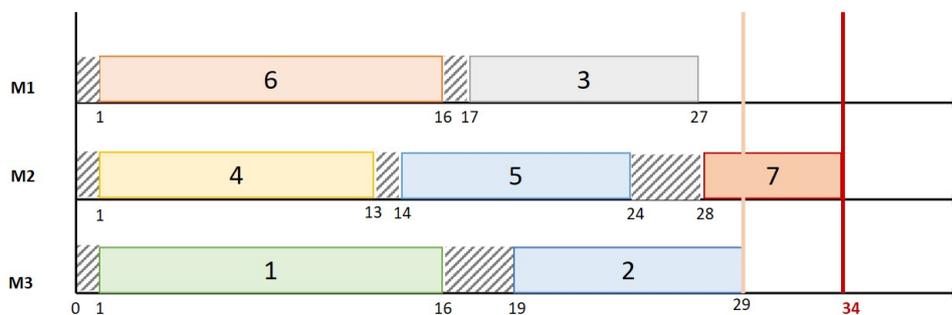


FIGURE 5.5 – Réordonnement de l'exemple après l'arrivée d'une nouvelle tâche. L'indicateur de stabilité égale 0 et celui des dates de fin égale 0

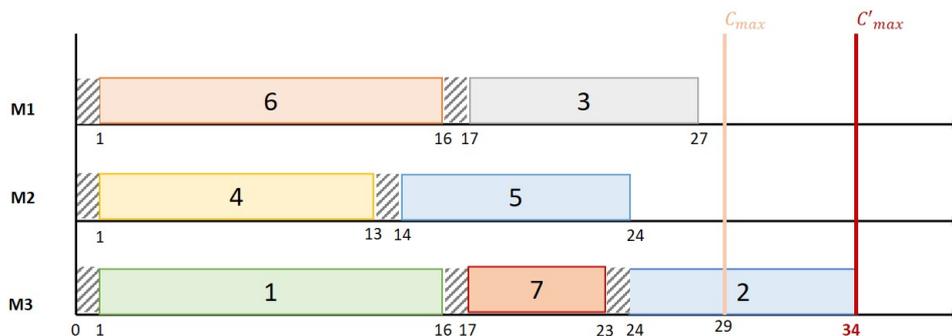


FIGURE 5.6 – Réordonnement de l'exemple après l'arrivée d'une nouvelle tâche. L'indicateur de stabilité égale 0 et celui des dates de fin égale 5

5.3.1 Générateur d'instances

Dans le but d'avoir plusieurs instances de caractéristiques différentes proches des données réelles, un générateur d'instances a été développé. La génération aléatoire est établie de la manière suivante avec des lois de probabilité définies à chaque étape. Le processus de génération se divise en deux étapes principales :

- Génération d'instances initiales qui sont ordonnancées en utilisant l'algorithme génétique d'ordonnancement
- Génération de perturbations sur la solution

Le tableau 5.3 détaille les différentes étapes de génération d'une instance inspirées de la méthode utilisée par [Yalaoui et Chu \(2003\)](#). Chaque instance est générée selon les lois de probabilité indiquées dans le tableau 5.3. Les données générées sont : le nombre de tâches à ordonnancer, l'éligibilité des machines pour chaque tâche, les temps de production et de changements. Les instances sont ordonnancées avec ces données initiales. Après quoi, une perturbation est générée aléatoirement parmi les quatre types possibles. Le réordonnancement est lancé dès qu'une perturbation le nécessite, il s'agit d'un ordonnancement event-driven. Une seule perturbation est donc générée pour chaque instance. Après la perturbation, les nouvelles disponibilités de chacune des ressources sont calculées. Dans l'exemple de la figure 5.3, quand la perturbation arrive à l'instant 7, M1 est indisponible jusqu'à l'instant 16 car il finit la tâche 6. De la même façon, la machine M3 est indisponible jusqu'à la fin de la tâche 1 à l'instant 16 également. Après cela, l'instance peut être réordonnancée en prenant en compte les prochaines disponibilités des machines M1 et M3 et l'indisponibilité de la machine M2. Chaque instance a donc des données différentes initialement et avant réordonnancement. Par exemple, elles n'ont pas le même nombre de tâches à ordonnancer et à réordonnancer puisque les tâches finies ou en cours ne sont plus prises en compte.

5.3.2 Fonctions objectifs

La méthode de résolution se base sur l'algorithme génétique d'ordonnancement utilisé dans le chapitre 4. Seule la fonction objectif est changée. Différentes fonctions objectifs ont été étudiées. Le premier objectif est de conserver l'efficacité de la solution, ce qui correspond à l'optimisation de la valeur du makespan (c_{max}). Cela reste l'objectif principal du réordonnancement car la performance de l'atelier prime sur la stabilité pour l'entreprise. De ce fait, la première fonction objectif étudiée est de minimiser uniquement la valeur de c_{max} . Les autres fonctions objectifs sont composées de deux éléments à optimiser : le c_{max} et une mesure qui garantie le plus possible une stabilité entre le planning initial et celui après réordonnancement. L'indicateur de stabilité choisi est le nombre de changements

Étape	Détail	Loi de probabilité
Instances pour l'ordonnancement		
1	Nombre de tâches à ordonnancer	Uniforme [50 ;350]
2	Pour chaque tâche, nombre de machines éligibles (max 5 machines) et numéro de machine affectée	Discrète : $P(1)=0.4$; $P(2)=0.3$; $P(3)=0.15$; $P(4)=0.1$; $P(5)=0.05$
3	Pour chaque tâches sur chaque machines éligibles, le temps de production	Uniforme [450 ;2500]
4	Pour chaque tâches sur chaque machines éligibles, le temps de changement $a * \min(p_{mi}, p_{mj})$ où $a = U(A; B)$	Uniforme : [A ;B]=[0.01 ;0.1] ; [0.05 ;0.1] ; [0.1 ;0.2] ; [0.1 ;0.2] or [0.2 ;0.5]
Instances perturbées pour le réordonnancement		
5	Le types de perturbation (4 types) : 1. Arrivée d'une nouvelle tâche ; 2. Annulation d'une tâche ; 3. Panne machine ; 4. Absence d'une ressource humaine	Discrète : $P(1)=1/4$; $P(2)=1/4$; $P(3)=1/4$; $P(4)=1/4$
6	Date de perturbation	Uniforme [0 ; c_{max}]
7	Calcul de la nouvelle disponibilité des ressources pour connaître la date minimum de début de tâche sur chacune des ressources	

TABLEAU 5.3 – Générateur aléatoire d'instances

d'affectation des tâches aux machines. Un coût de pénalisation est utilisé pour la stabilité, cela permet une tolérance car un nombre fixé de changements parmi la totalité des tâches peut être toléré. Quand des changements interviennent juste après la date de réordonnancement, donc proche de la date actuelle, cela perturbe l'organisation de travail déjà en place : des changements de réglages des machines ont pu être faits, les opérateurs ont déjà les informations sur le travail à faire et à venir. Cependant, quand des changements sont prévus à la fin de l'horizon, le planning peut changer sans pénaliser l'organisation. Au final, sept fonctions objectives sont comparées. Pour chacune une combinaison linéaire de ces deux objectifs est définie :

1. Minimisation de c_{max}
2. Minimisation de c_{max} et pénalité si le nombre de changements d'affectation est supérieur à 10% du nombre de tâches

3. Minimisation de c_{max} et pénalité si le nombre de changements d'affectation est supérieur à 30% du nombre de tâches
4. Minimisation de c_{max} et pénalité si le nombre de changements d'affectation est supérieur à 50% du nombre de tâches
5. Minimisation de c_{max} et pénalité si le changement d'affectation a lieu moins de 24 heures après la date de réordonnancement
6. Minimisation de c_{max} et pénalité si le changement d'affectation a lieu moins de 48 heures après la date de réordonnancement

Suite à la mise en place de cette méthode de résolution et la génération d'instance, une campagne de test a été élaborée. Celle-ci est présentée dans la section suivante.

5.4 Campagne de tests numériques

La méthode de résolution est basée sur le même algorithme génétique que celui utilisé dans le chapitre 4 pour résoudre le problème d'ordonnancement. Il a été implémenté en langage Python. Seule la fonction objectif est modifiée. Différentes mesures d'évaluation ont été étudiées et les résultats ont été analysés pour proposer le meilleur scénario à appliquer au responsable de l'atelier tricotage. Nous avons généré 60 instances avec des perturbations différentes. En moyenne, les instances sont composées de 189 tâches à ordonnancer initialement. Pour chaque instance, toutes les fonctions objectifs ont été appliquées et comparées. Après perturbation, il reste en moyenne 111 tâches à ordonnancer. Les tâches terminées ou commencées qui ne sont pas concernées par la perturbation, ne sont pas réordonnées. La date de perturbation est en moyenne générée à 26% de la valeur de c_{max} de l'ordonnancement initial optimisé. La performance moyenne ainsi que la stabilité en fonction du nombre de tâches à réordonner sont représentées sur la figure 5.7. De façon similaire, la figure 5.8 représente l'évolution de la performance et de la stabilité en fonction de la date de perturbation générée.

Les instances ont été groupées selon le type de perturbation qui leur est appliquée. Pour chaque groupe, le résultat est donné par une moyenne et son écart type évalué pour chaque instance. Le tableau 5.4 montre pour chaque groupe, l'objectif de performance c_{max} obtenu quand il s'agit de l'unique paramètre à optimiser dans la fonction objectif. La valeur de stabilité est la référence pour évaluer les autres fonctions objectifs. Cette valeur est calculée de la façon suivante : pour chaque tâche i , si l'affectation de la machine dans le planning initial est différente par rapport à après le réordonnancement, $a_i = 1$, sinon $a_i = 0$. La valeur dans le tableau 5.4 est : $\sum_{i=1}^N a_i$. Pour l'évaluation de performance et de stabilité, les déviations

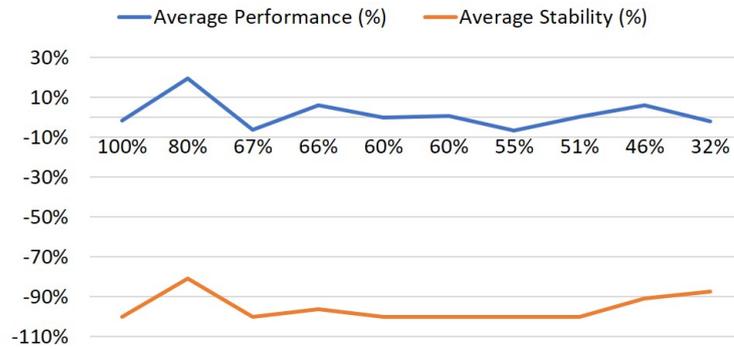


FIGURE 5.7 – Performance et stabilité en fonction du pourcentage de tâches à réordonner

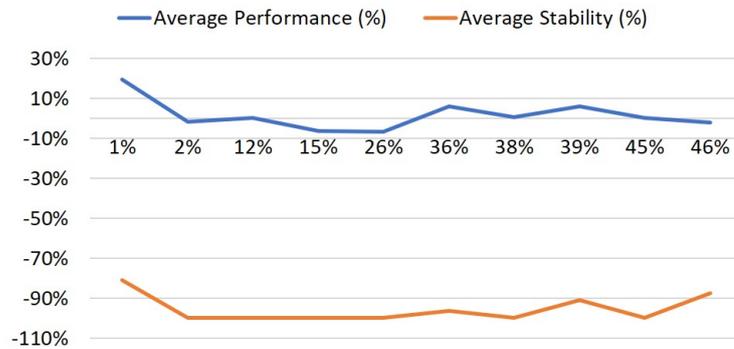


FIGURE 5.8 – Performance et stabilité en fonction de la date de perturbation

standards sont données. Dépendantes de la perturbation et des données de l'instance, la performance et la stabilité peuvent être affectées de manière différente dans un même groupe. La répartition des valeurs de performance et de stabilité est donnée par les graphiques aux figures 5.9 et 5.10.

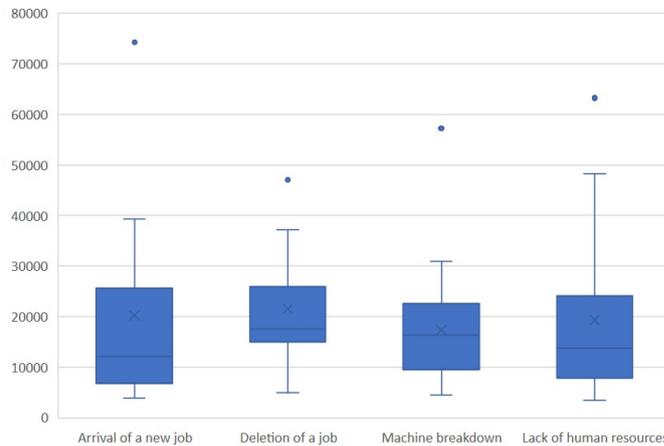


FIGURE 5.9 – Répartition des valeurs de performance pour chaque type de perturbation en minimisant uniquement c_{max}

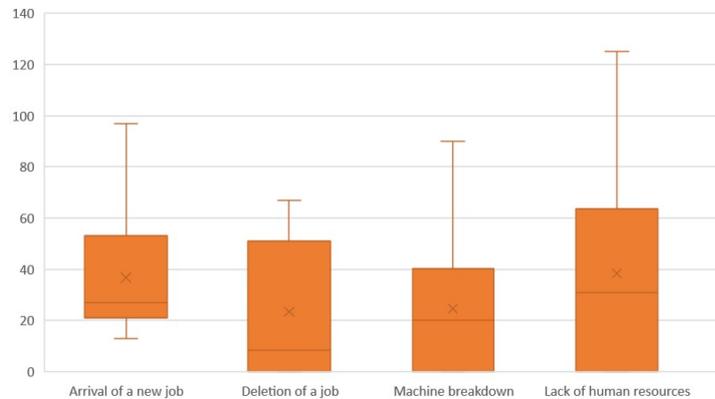


FIGURE 5.10 – Répartition des valeurs de stabilité pour chaque type de perturbation en minimisant uniquement c_{max}

Dans le tableau 5.5, les résultats obtenus avec les six autres fonctions objectifs sont donnés en pourcentage de déviation par rapport à la référence donnée par la minimisation uniquement du c_{max} . Il peut être observé que l'objectif de performance n'est pas beaucoup dégradé. En revanche, la stabilité est considérablement

Fonction objectif	Taille des instances	1	
		Performance	Stabilité
Perturbation	Nombre initial de tâches		
Arrivée d'une nouvelle tâche	183±101	23 129±22 068	40±27
Annulation d'une tâche	204±57	21 492±11 212	23±26
Défaillance d'une machine	181±87	21 607±17 964	43±40
Absence d'une ressource humaine	188±59	18 966±11 188	27±27
Total	189±72	20 786±14 626	32±31

TABLEAU 5.4 – Résultats références en optimisant c_{max} pour les différentes perturbations

améliorée jusqu'à 97% quand les différences d'affectation des tâches aux machines sont prises en considération. Comme précédemment, pour chaque tâche i , si l'affectation initiale est différente de celle après réordonnancement, $b_i = 1$, sinon $b_i = 0$. La valeur de stabilité de la table 5.5 est calculée par :

$$\frac{\sum_{i=1}^N b_i - \sum_{i=1}^N a_i}{\sum_{i=1}^N a_i} \quad (5.1)$$

Si la valeur de stabilité est égal à 0%, cela signifie que le nombre de changements d'affectation de tâches est le même que pour le réordonnancement sans prise en compte de la stabilité. Par exemple, pour le groupe "Arrivée d'une nouvelle tâche", dans le tableau 5.5, quand la valeur de stabilité attend -100%, 40 tâches (tableau 5.4) n'ont pas de changement d'affectation comparé à l'ordonnancement initial alors qu'il y avait un changement sans l'objectif de stabilité. Quand la valeur de stabilité est supérieure à 0%, cela signifie qu'il y a eu plus de changements que dans le planning réordonnancé initial. Cela peut arriver quand les changements ne sont pénalisés qu'au delà d'un pourcentage important de tâches. Finalement, la pénalité ne va pas s'appliquer et des changements vont se produire. Un exemple est visible dans le tableau 5.5 : dans le groupe "Arrivée d'une nouvelle tâche" les fonctions objectif de 4 et 5 sont positives.

5.4. Campagne de tests numériques

Fonction objectif	2		3	
Perturbation	Performance	Stabilité	Performance	Stabilité
Arrivée d'une nouvelle tâche	5%±9	-96%±6	8%±13	-67%±33
Annulation d'une tâche	5%±9	-100%±1	1%±3	-67%±40
Défaillance d'une machine	8%±14	-98%±4	0%±6	-59%±47
Absence d'une ressource humaine	6%±13	-96%±10	1%±6	-54%±60
Total	6%±12	-97%±7	2%±7	-60%±49

Fonction objectif	4		5	
Perturbation	Performance	Stabilité	Performance	Stabilité
Arrivée d'une nouvelle tâche	3%±7	13%±39	2%±5	13%±85
Annulation d'une tâche	0%±7	-56%±47	0%±6	-56%±47
Défaillance d'une machine	0%±6	-40%±49	0%±4	-56%±52
Absence d'une ressource humaine	1%±5	-18%±55	1%±4	-21%±60
Total	1%±6	-27%±49	1%±5	-29%±63

Fonction objectif	6		7	
Perturbation	Performance	Stabilité	Performance	Stabilité
Arrivée d'une nouvelle tâche	4%±15	-58%±47	5%±13	-61%±48
Annulation d'une tâche	-2%±5	-65%±42	-1%±7	-62%±45
Défaillance d'une machine	-2%±6	-57%±49	2%±6	-68%±40
Absence d'une ressource humaine	1%±6	-70%±40	1%±5	-67%±55
Total	0%±8	-64%±43	1%±8	-65%±48

TABLEAU 5.5 – Résultats de performance et stabilité en appliquant les différentes fonctions objectifs aux différentes perturbations

5.5 Conclusion

L'originalité de l'étude faite dans ce chapitre vient une nouvelle fois de son application à l'industrie textile. Une nouvelle méthode d'évaluation de la stabilité sur le problème de réordonnancement a été testée dans le but de proposer à l'entreprise une solution pertinente. Différentes fonctions d'évaluation ont été testées et évaluées grâce au générateur d'instances. Les instances générées ont des caractéristiques proches des instances réelles et en sont représentatives. L'entreprise est ainsi en mesure d'évaluer le scénario le plus approprié au réordonnancement en connaissant son impact à la fois sur la performance de la solution et sa stabilité. La continuité de ce projet est de permettre à l'entreprise de relancer le calcul du planning pour réordonner l'atelier de production chaque fois qu'un aléa se produit et que cela est nécessaire. La méthode doit auparavant être testée sur les données réelles issues de la production. Il s'agit de la prochaine étape dans le projet mené par Petit Bateau. La mise en place du réordonnancement est une grande avancée dans la route vers l'usine 4.0. Pour aider à la mise en place d'un système de réordonnancement, il est nécessaire pour Petit Bateau de faire évoluer son système d'acquisition de données. En effet, celui-ci ne permet pas de tracer l'avancée des OF en production. Seulement la date de lancement de l'OF (identique pour tous les OF d'une semaine) et la date d'entrée en stock est relevé informatiquement. Une avancée journalière est relevée manuellement. Il n'est pas aujourd'hui possible de savoir la date de début sur machine d'un OF, le nombre de pièces réalisées et restant à faire, ni le temps de production réel. Sans ces informations, mettre en place un réordonnancement demanderait beaucoup de saisies manuelles pour recalculer le planning à la réalité avant de lancer le calcul. Cela consommerait trop de temps au responsable d'atelier. Dans l'objectif de palier cela et de permettre d'appliquer l'algorithme de réordonnancement, un projet de mise en place d'un suivi est à l'étude. Celui-ci se compose de deux parties : une première pour suivre les OF de manière plus précise (date de début, fin de chaque pièce, fin de l'OF, temps de production réelle, rendement par exemple). Le second consiste à équiper les machines de capteurs pour relever les arrêts, leur cause, leur durée, ect. Les machines sont de génération très variées. Il faut donc trouver un système unique et commun pour toutes. En plus de permettre un réordonnancement précis, ces données pourront être utilisées pour de nombreuses analyses et permettent une amélioration des performances de l'atelier mais également de donner de l'information en temps réel aux différents acteurs de la chaîne de production (fiabiliser des délais pour la logistique, tracer la production et les aléas pour la qualité...)

Chapitre 6

Mise en application

Sommaire

6.1	Description du projet	138
6.2	Logiciel d'ordonnancement	143
6.3	Conclusion	151

Résumé

Ce chapitre est consacré à la mise en place d'un logiciel d'ordonnancement au sein de l'entreprise. Le projet est expliqué de sa conception à sa mise en place. Les résultats obtenus sont discutés. Ce logiciel a permis de concrétiser la théorie développée au cours du travail de recherche.

6.1 Description du projet

Pour permettre à l'entreprise de bénéficier pleinement des avancées scientifiques faites dans le cadre de la thèse présentée dans ce document, il était important de proposer une solution packagée et utilisable par les employés de l'entreprise. L'objectif principal de la thèse porte sur la réalisation d'un logiciel d'ordonnement. Comme vu dans le chapitre 4, un algorithme génétique a été développé pour permettre l'ordonnement des instances de production tricotage de Petit Bateau. Pour packager cet algorithme, le rendre utilisable facilement et exploiter de manière simple et rapide ses résultats, l'entreprise a fait appel à la société Opta LP. Cette entreprise est spécialisée dans la production de solutions logicielles d'optimisation des flux logistiques et de production. Créée par un consortium de chercheurs, de managers et d'investisseurs, cette start-up possède aujourd'hui le label Jeune Entreprise Universitaire. Elle applique et prolonge les travaux de recherche fait à l'UTT vers l'industrialisation pour l'application en entreprise. Le projet a reçu un financement régional pour son aspect innovant et l'avancement qu'il apporte à l'entreprise dans l'objectif de se moderniser. Il s'agit du premier projet concret de Petit Bateau qui l'amène vers une usine 4.0.

L'objectif du projet est de répondre aux trois questions suivantes qui caractérisent l'action d'ordonner :

- Quand fabriquer ?
- En combien de temps ?
- Sur quelle machines ?

Pour répondre à ces trois questions de manière opérationnelle, il faut prendre en compte les moyens humains et matériels disponibles de la meilleure façon possible tout en respectant au maximum les délais. Jusqu'à présent, l'entreprise n'avait aucun outil d'aide à la décision sur ce niveau de prise de décision. L'ordonnement était fait de manière empirique, manuellement par une personne disposant de l'ensemble du savoir-faire sans aucune garantie de pérennité à la suite de son départ à la retraite. La figure 6.1 donne un exemple de feuille d'ordonnement.

Le projet s'est mis en place pour permettre la transition et l'accompagnement du départ de la personne en charge de l'ordonnement. Il doit pérenniser le savoir-faire, optimiser l'ordonnement et s'adapter à une nouvelle organisation de travail. D'un point de vue des pratiques opérationnelles, l'ordonnement sera automatique sur un horizon d'une semaine. Des simulations par changement de paramètres devront être possibles. Un calcul de charge homme devra être déduit du planning d'ordonnement ainsi qu'une indication sur les ressources critiques à suivre. Du point de vue des connaissances techniques, ce projet permet de regrou-

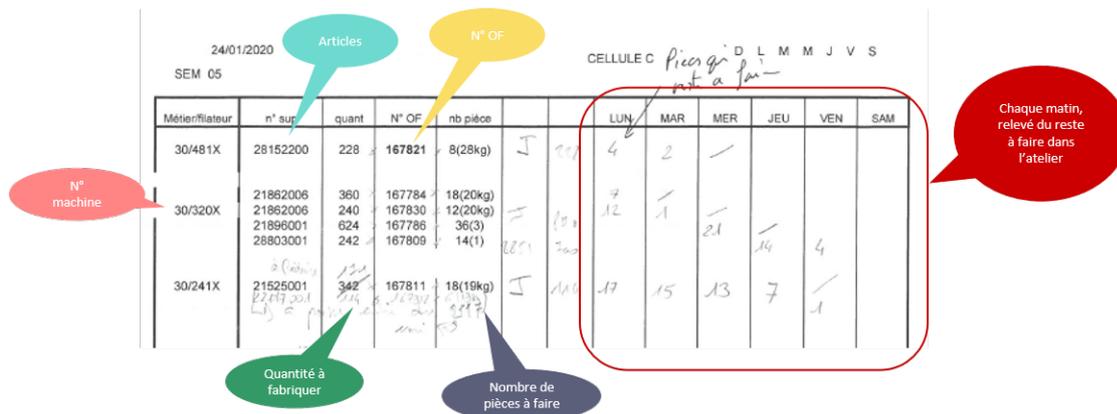


FIGURE 6.1 – Feuille d’ordonnancement réalisée manuellement

per les données techniques (machines, tricots...) dans un système d’information commun et de nouvelles données telles que les temps de changement ont été spécifiquement créées.

Ce projet doit porter l’atelier tricotage vers une amélioration de sa performance. Les gains estimés portent sur :

- la productivité :
 - un meilleur ajustement des ressources
 - une maîtrise des temps de production et de réglage
- les délais :
 - une diminution des lead times
 - un pilotage des ressources
- l’agilité :
 - une aide à la décision opérationnelle
- la responsabilité sociale de l’entreprise (RSE) :
 - une capitalisation des savoir-faire
 - une collaboration avec une startup locale

6.1.1 Planning projet

Le projet ayant pour ambition d’accompagner la transition de l’atelier suite au départ à la retraite du responsable d’atelier, il était important d’avoir une solution opérationnelle à ce moment là : en janvier 2021. Le macro planning du projet est donné en figure 6.2. La demande d’investissement a été passée le 28 juillet 2020. Sa

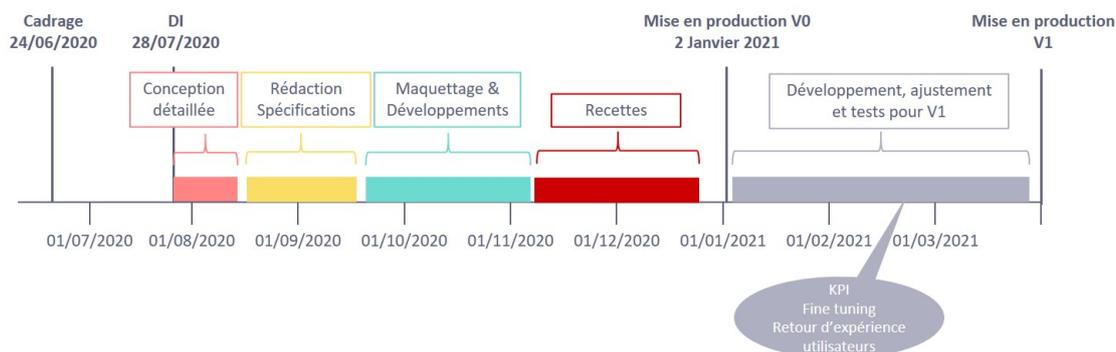


FIGURE 6.2 – Macro planning du projet de développement du logiciel d’ordonnement

validation a permis le déclenchement de la suite du planning prévisionnel. Celui-ci prévoit une phase de conception détaillée suivie de la rédaction des spécifications. Il est ensuite prévu du temps pour réaliser des maquettes de l’attendu pour validation puis les développements. Suite à cela, devait suivre la phase de recettes et de tests. Une première version fonctionnelle du logiciel a été mise en production pour le départ à la retraite du responsable d’atelier en janvier 2021. Du temps a encore été consacré les mois suivants sur ce projet avec l’amélioration du logiciel suite aux remontées utilisateurs, l’ajustement de l’algorithme et la mise en place d’indicateurs.

Un planning avec le détail de chaque tâche est donné en figure 6.3 et le planning réalisé est fourni en figure 6.4. Le délai prévu a été respecté : une première version capable d’ordonnancer une semaine de production a été délivrée en janvier 2021. Les recettes (tests et validation des fonctionnalités) n’étaient pas totalement terminées, elles se sont poursuivies sur les mois suivants. La validation définitive de cette version a été actée en avril 2021.

6.1.2 Équipe projet

L’équipe projet a été composée des différents acteurs nécessaires à la réussite de la réalisation du logiciel :

- Les responsables de l’atelier tricotage pour la partie connaissance métier et le besoin utilisateur
- L’équipe informatique de Petit Bateau pour le développement des interfaces permettant l’alimentation du logiciel par les données nécessaires
- L’entreprise Opta LP en charge du développement de la solution pour encapsuler l’algorithme d’ordonnement

6.1. Description du projet

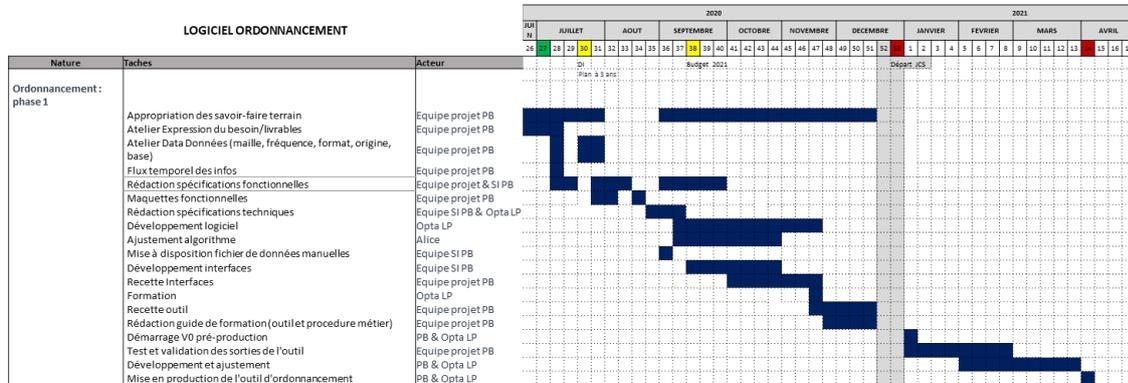


FIGURE 6.3 – Planning détaillé du projet de développement du logiciel d'ordonnancement

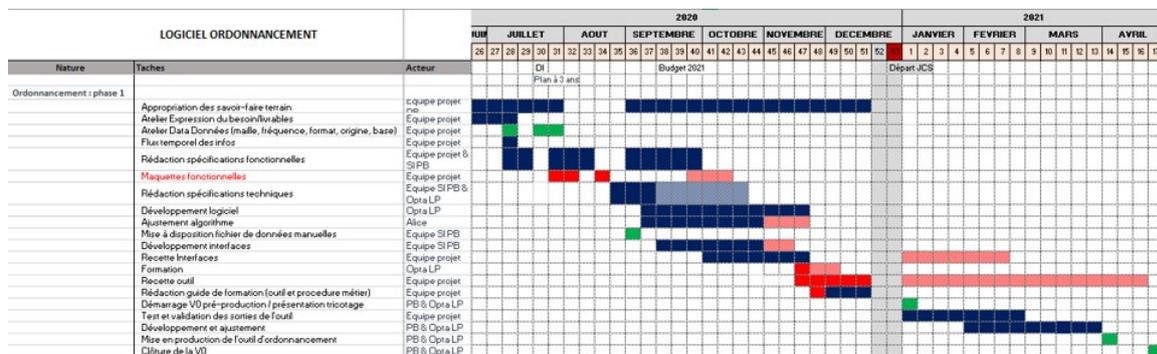


FIGURE 6.4 – Planning détaillé réalisé du projet de développement du logiciel d'ordonnancement

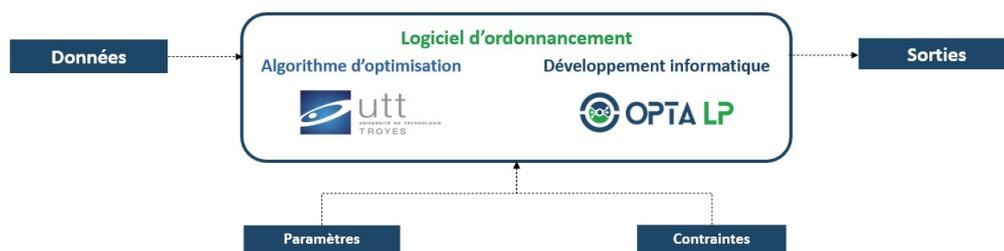


FIGURE 6.5 – Représentation du fonctionnement général du logiciel d’ordonnement

- L’équipe de recherche de l’UTT et moi-même pour le développement de l’algorithme d’ordonnement, moteur du logiciel
- L’équipe projet stratégique de Petit Bateau pour le suivi du projet et les relations entre les différents intervenants

6.1.3 Cahier des charges

Afin d’exploiter efficacement l’algorithme d’optimisation de l’ordonnement pour optimiser les performance et la productivité de l’atelier de tricotage, une phase de packaging de l’algorithme et de développement informatique est nécessaire. Cela a permis le développement d’un logiciel d’optimisation avec l’entreprise Opta LP. Ce logiciel a été installé sur un serveur de Petit Bateau et interfacé avec ses systèmes d’information.

Le logiciel doit ainsi permettre :

- La lecture et le traitement des données d’entrée
- La prise en considération des différents paramètres et variables
- Le lancement de l’algorithme d’optimisation développé pour optimiser l’ordonnement en envoyant à l’algorithme les données d’entrée nécessaires et en récupérant les données de sortie (résultats de l’algorithme d’ordonnement)
- L’affichage des données lues et des résultats de l’algorithme d’optimisation

La figure 6.5 représente le fonctionnement général du logiciel en collaboration entre l’UTT pour l’algorithme et Opta LP pour le packaging.

6.2 Logiciel d'ordonnancement

6.2.1 Données existantes

Pour faire fonctionner le logiciel basé sur l'algorithme développé, celui-ci a besoin d'être alimenté en données. Une grande partie des données nécessaires étaient existantes dans les systèmes d'information de l'entreprise mais réparties dans de multiples logiciels. Il a donc été nécessaire dans un premier temps de recenser les données nécessaires et les localiser dans les infrastructures. Les données existantes étaient réparties dans les logiciels suivants :

- l'ERP de l'entreprise : gestion des ordres de fabrication
- une base de données Access maintenue manuellement : gestion des données techniques des produits
- une base de données nommée Cockpit créée pour alimenter le logiciel de planification et maintenue manuellement : gestion des cadences de production de chaque produit sur chaque machine

Les données ainsi que leur source sont données dans le tableau 6.1. La remontée des données se fait par échanges de fichiers .csv générés par le service informatique de Petit Bateau. La figure 6.6 illustre ce flux.

Données	Sources
N° OF	ERP
Code support	ERP
N° machines	Cockpit
Gamme de production	Cockpit
Quantité reste à faire	ERP
Poids/pièce	ERP
Nombre de pièces par lot	ERP
Titrage	Access
LFA pour 100 aiguilles	Access
Chutes par cycle	Access
Nombre d'aiguilles	Access
Nombre de chutes maximum	Access
Rendement	Access
Jauge support	Access
Vitesse (tr/min)	Access

TABLEAU 6.1 – Sources des données existantes



FIGURE 6.6 – Flux d'échange de données entre Petit Bateau et le logiciel

6.2.2 Création de données

D'autres données n'étaient pas présentes dans les bases de données. Ces données peuvent être découpées en deux catégories :

- les données de paramétrages nécessaires à contraindre l'algorithme par rapport à la réalité de l'atelier. Elles ont été directement créées dans l'interface du logiciel pour que l'utilisateur puissent les modifier selon la situation de l'atelier. Ces données sont les suivantes :
 - Jauge métier actuel
 - Nombre de cellules
 - Calendrier du nombre de ressources machines dans chaque cellule
 - Calendrier du nombre de régleurs présents
 - Affectation des métiers aux cellules
 - Métier électronique
- les données nécessaires au calcul de temps de changement. Ces temps de changement, n'étaient pas connus ni standardisés dans un outil ou une base de données. Il a dans un premier temps été nécessaire de déterminer la méthode de calcul et la relier aux données (existantes ou non) nécessaires. La figure 6.7 décompose les temps de changements dans l'atelier de tricotage et fait le lien avec les données qui permettent de réaliser les calculs.

Les données existantes ont été interfacées comme expliqué dans la partie précédente (6.2.1). Les autres ont été créées dans le logiciel et peuvent y être modifiées notamment les matrices nécessaires pour déterminer le temps de changement d'armure entre deux supports sur chacune des machines.

Changement	Longueur de Fils Absorbé (LFA)	Programmation électronique	Chutes : Annulation / Remises	Armure  Cames Aiguilles Platines
Durée (temps moyen)	30 min	15 min	15 min/chutes	3 à 18h
Dépend ?	Modèles	Métiers	Modèles & métiers	Modèles & métiers
Quand ?	Si LFA différentes	Si métier électronique	Si nombre de chutes différent	
Données	Fiche technique (PLM)	Liste fixe	Fiche technique (PLM)	

Construction d'une matrice par métier des temps de changement entre les différentes familles de supports

FIGURE 6.7 – Décomposition des temps de changement dans l'atelier de tricotage

6.2.3 Élaboration du logiciel

Fonctionnalités

Le logiciel permet à l'utilisateur de visualiser les données qui vont être utilisées par l'algorithme, de modifier les paramètres nécessaires, de lancer l'algorithme et de visualiser le résultat sous la forme d'un graphique Gantt. Les écrans et fonctionnalités sont les suivants :

- **Visualisation des ordres de fabrication (OF) à réaliser avec leur statut** (à ordonnancer, ordonnancé, arrivée en cours de semaine, en cours, en retard ou terminé) (figure 6.8). Le détail de chaque OF est consultable et correspond aux données extraites depuis l'ERP.
- **Visualisation et paramétrage des métiers de l'atelier.** La jauge du métier paramétrable permet de connaître l'état actuel du métier dans l'atelier et de pouvoir affecter une production cohérente dans l'algorithme. La couleur des métiers indique si le métier est théoriquement en fonctionnement à la date et l'heure du moment.
- **Visualisation des caractéristiques produits (des supports)** (figure 6.10). Ces données sont extraites de la base de données techniques Access. Cette base est enrichie au fur et à mesure des semaines en indiquant pour chaque support non encore connu mais programmé pour la semaine suivante, une famille armure. Cette donnée nous permet de calculer les temps de changement.

- **Visualisation et paramétrage des calendriers de ressources** (figure 6.11). Cet écran permet au responsable d'atelier d'indiquer le nombre de ressources disponibles pour la semaine suivante. S'il y a des absents ou des machines en panne, cela permet à l'algorithme d'ordonnancement d'en tenir compte.
- **Visualisation et paramétrage des temps de réglage** (données créées spécialement pour ce projet) (figure 6.12). Cet écran permet de paramétrer l'ensemble des temps de changement possibles entre deux supports selon les familles de métier. Ces données n'étaient pas connues avant le projet. Elles ont donc été créées pour permettre un ordonnancement cohérent.
- **Fenêtre de lancement de l'ordonnancement après correction d'anomalies remontées** (figure 6.13). Avant de lancer l'ordonnancement de la semaine à venir, un certain nombre de vérifications sont faites par le logiciel. Si besoin, des informations peuvent être demandées à l'utilisateur. Par exemple, c'est ici que doivent être renseignées les familles armures de chaque nouveau support. C'est également par cet écran que sont saisies les dates de fin des OF de la semaine en cours qui ne seront pas terminés avant le début de la semaine suivante.
- **Fenêtre de visualisation du planning proposé pour la semaine à venir** (figure 6.14). Le résultat de l'algorithme d'ordonnancement est affiché sous la forme d'un Gantt. Les indisponibilités saisies via les calendriers sont indiquées en gris. Les temps de changement sont visibles par des hachures. Enfin en cliquant sur un OF, les détails le concernant s'affichent (code support, quantité. ...).

Utilisation

Suite à sa mise en production, le logiciel a commencé à être utilisé par le responsable d'atelier. Malgré une bonne cohérence dans le planning proposé, plusieurs freins ont été présents à l'utilisation. Les deux plus importants sont :

- Le temps nécessaire pour entrer manuellement les informations d'encours de la semaine précédente pour bloquer les ressources nécessaires à terminer est important (de 30 minutes à 1 heure par semaine). L'ordonnancement est lancé le vendredi mais la semaine de production termine le mardi matin à 5h. Il est donc normalement que toute la production ne soit pas finie mais il est nécessaire de recalculer cet encours par rapport à la production réelle avant de lancer l'ordonnancement. Le projet de mise en place d'un suivi de production en temps réel devrait aider à réduire ce temps de non valeur ajouté. Les dates de début d'OF seraient précisément connues et un temps de production restant permettrait d'estimer la date de fin.

6.2. Logiciel d'ordonnancement

Abertior Administrateur

Accueil

Liste des ordres de fabrication

Code Code support Libellé support N° séquentiel Statut Priorité Etat

N° OF	Métier	Code support	Libellé support	N° séquentiel	Qté programmée	Reste à faire	Statut
172949		2252001	C-KEPVINTAGE BIO ECRU FR IMP	1021071	14	14	LANC
172908		2168300	C() BIO CO ECRU POUR IMPRESS	1021071	140	451	LANC
172912		2252001	C()BOMARINES(MARSH-HA)SMOK TTR	1021071	684	462,8	LANC
172950		2252001	C()BOMARINES(MARSH-HA)SMOK TTR	1021071	684	456,4	LANC
Date de début ordonnance : 16/02/2021 à 23:10 Retard : Pas de retard Qté initiale : 684 Qté reste à faire : 456,4 Priorité: Normale Date de fin ordonnance : 25/02/2021 à 03:28 Qté réalisée : 227,6							
172990				1021078	14	14	OUV
172991				1021078	20	20	OUV
172992				1021078	14	14	OUV
172848		2236700	C() FX T-1 NOSTALGIE ECRU	1021071	342	116,2	LANC
172951		2252700	COTE () BIO ECRU TTR	1021071	140	459,2	LANC
172845		2161300	JERSEY COTON(LYCHA ECRU	1021071	465	230,8	LANC
172947		2189400	BV PLAT 2,5 MM C()FE ETE ECRUE	1021071	120	724,8	LANC
172843		2173302	MOLLETON ZEN CHINE BELLUA	1021071	684	684	LANC

FIGURE 6.8 – Écran de visualisation des ordres de fabrication

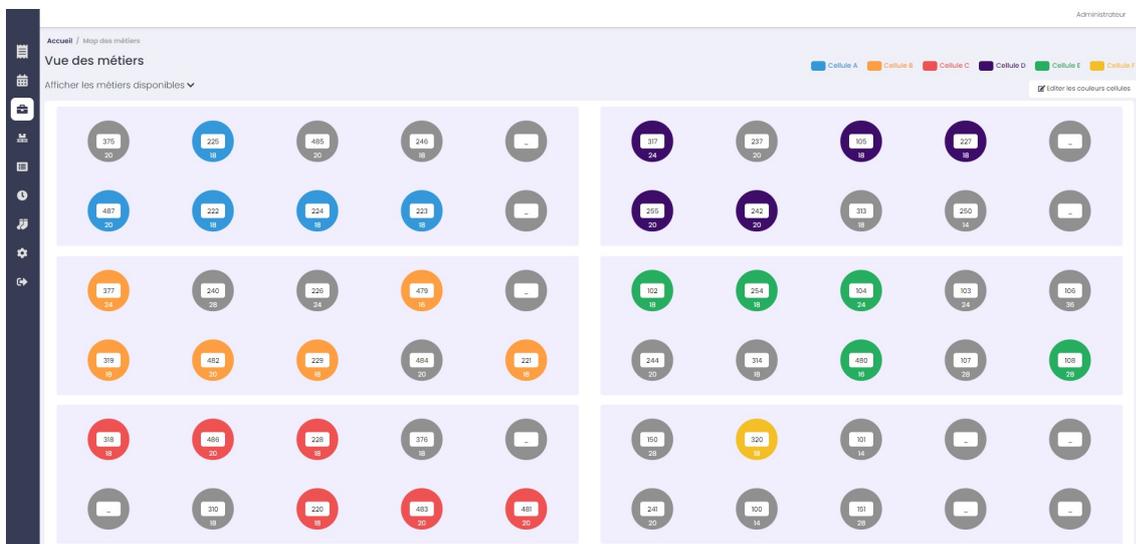


FIGURE 6.9 – Écran de visualisation des métiers de l'atelier

Accueil / supports aberthier
Administrateur

Liste des supports

Code support	Libellé support	Chutes total/cycle	Poids pièces	Taille de lot	Type	Famille armure
2885848	EV MARINEREMARSHMAL/LANTERN	44	20	240	RAYE	i
23679003	JY TOKYO4X4JAZMIN/MARSHMALLO	44	28,5	228	RAYE	i
23679001	JY TOKYO4X4TEHON/MARSHMALLO	44	28,5	228	RAYE	i
22902001	C2/LUGENE BIO CHINEE BELUGA	54	19	228	CHINE	i
22342009	C2/ZMARINERE MARSHM(SMCKING	54	19	228	RAYE	i
21679006	JY FLAMME/MARINERESMCK/SBCKI	90	28,5	228	RAYE	i
28759026	BE 1000R 4X4 HORS COURS GARCON	44	19	228	RAYE	i
2885842	EV MARINEREMARSHMAL/SOSQUET	44	20	240	RAYE	i
2885843	EV MARINEREMARSHMAL/LMYTHE	44	20	240	RAYE	i
22342008	C2/ZMARINERE MARSHM/TERKUIT	54	19	228	RAYE	i
22342007	C2/ZMARINERE MARSHM/MEDEVA	54	19	228	RAYE	i

FIGURE 6.10 – Écran de visualisation des caractéristiques supports

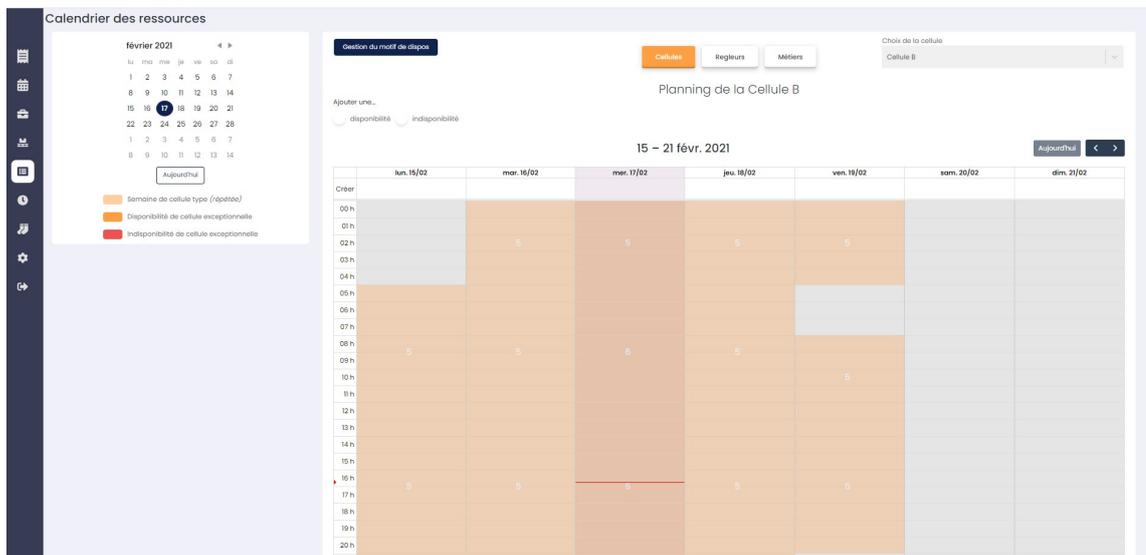


FIGURE 6.11 – Écran de gestion des calendriers des ressources disponibles

The screenshot shows the 'Temps de changements' interface. The left sidebar contains navigation icons. The main content area is titled 'Les temps de changements' and includes a 'Liste des métiers' table and a 'Temps de changement Famille' table.

Job Family	Job Numbers
Simple fonture Jersey 1	100, 317, 103, 101, 102, 314, 104, 105
Simple fonture Jersey 2	107, 108, 108
226 223	223, 226
Double fontures 1	224, 228, 227, 226, 246, 222, 229, 250
Double fontures 2	244, 255, 241, 242
Simple fonture Bouclette	319, 318, 320, 310, 313
Simple fonture Jersey 3	375, 377
Double fontures 3	479, 480
239 254	239, 254
483 486	486, 483

Transition	Duration (min)
jersey → molleton visible	150 min.
molleton visible → jersey	150 min.
jersey → molleton invisible	480 min.
molleton invisible → jersey	480 min.
jersey → piqué	150 min.
piqué → jersey	150 min.
molleton invisible → molleton visible	480 min.
molleton visible → molleton invisible	480 min.
molleton invisible → piqué	480 min.
piqué → molleton invisible	480 min.
molleton visible → piqué	150 min.
piqué → molleton visible	150 min.

FIGURE 6.12 – Écran de gestion des temps de changement et leurs paramètres

The screenshot shows the 'Vérifications ordonnancement' interface. It includes a 'Lancer l'ordonnement' button and two verification sections, both with green checkmarks indicating no changes are needed.

Veuillez vérifier toutes les conditions avant de lancer l'algorithme

OF en retard
Support manquant
Métier manquant
Famille armure manquante

Vérification des OF

✓ Aucune modifications à apporter

Vérification des supports

✓ Aucune modifications à apporter

FIGURE 6.13 – Écran de lancement de l'algorithme d'ordonnancement

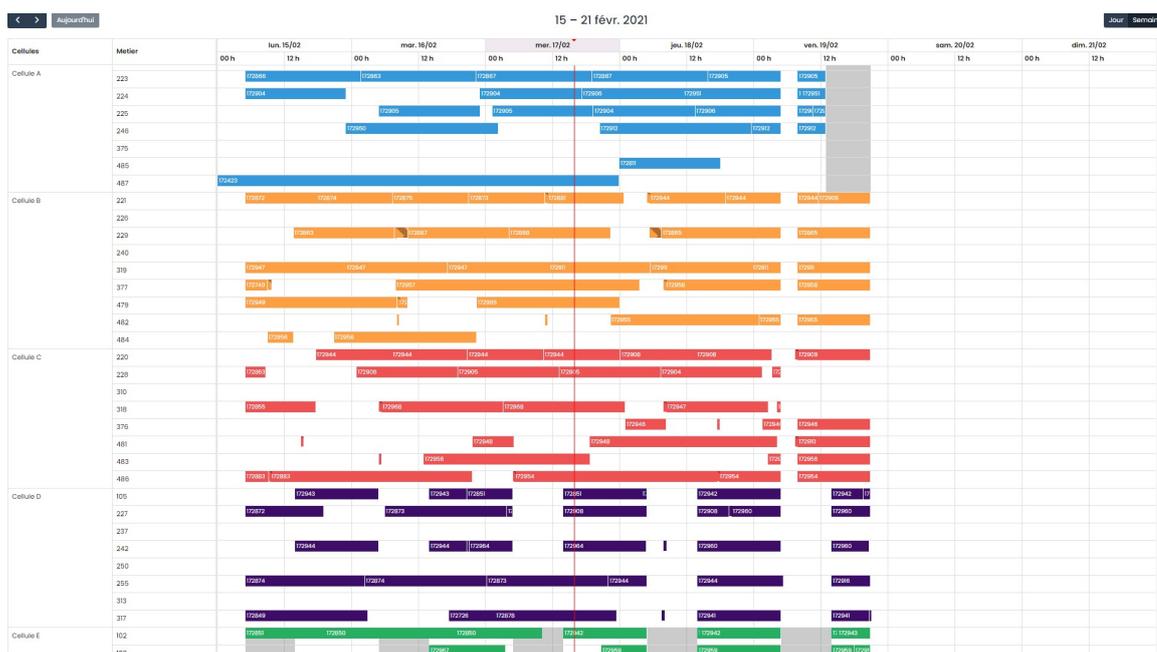


FIGURE 6.14 – Écran de visualisation du planning proposé par l’algorithme d’ordonnancement

- Le délai entre la production du planning le vendredi après-midi et le démarrage le lundi matin était trop court. L’effectif pour préparer l’atelier et le réglage des machines n’est pas suffisant le vendredi après-midi pour commencer dans de bonnes conditions à suivre le planning le lundi. Il a été décidé de décaler le commencement du programme au mardi à 5h au lieu du lundi à 5h. Cela laisse une journée pour préparer l’atelier et informer les opérateurs du travail à réaliser. Cependant, si la machine est indiquée disponible dès le lundi, l’ordonnancement continuera de proposer un démarrage de la production au lundi pour ne pas arrêter les machines qui ont des volumes à produire.

Une nouvelle version est en cours d’élaboration. Celle-ci va permettre d’améliorer l’ergonomie pour répondre aux remontés des utilisateurs. Elle va également inclure de nouvelles fonctionnalités telles que :

- Permettre la saisie des causes d’indisponibilité
- Faciliter les saisies en pré-calculant par exemple le temps restant théorique d’une tâche non terminée

- Faciliter l'interprétation du résultat de l'ordonnancement en créant différents visuels selon l'utilisation à faire (visuel par cellule et équipe pour identifier rapidement le travail à attribuer à chaque bonnetier, un tableau récapitulatif des actions à mener dans SAP pour suivre le planning proposé)
- Traiter les données pour mettre en place des indicateurs visuels à la fois sur la qualité de l'ordonnancement proposé et sur le respect de planning en fin de semaine
- Modifier l'algorithme pour améliorer la solution d'un point de vu utilisateur sans impacter la valeur objectif (parcourir les solutions équivalentes en fonction objectif mais différentes dans la pratique de l'atelier).

Comme pour tout changement d'outil de travail, il est nécessaire d'avoir un temps de transition et d'accompagnement pour s'habituer à l'outil et changer ses habitudes. L'arrivée de nouvelles fonctionnalités dans la version suivante va également permettre une lecture plus facile du planning proposé. Elles vont également faciliter la compréhension des tâches à effectuer dans l'ERP pour suivre la proposition et répartir le travail sur les opérateurs en fonction des machines à faire fonctionner.

6.3 Conclusion

Le travail de recherche réalisé dans le cadre de cette thèse a pu être fortement valorisé au sein de l'entreprise grâce au développement d'un logiciel incorporant l'algorithme génétique d'ordonnancement. Ce travail de collaboration entre des acteurs différents (métier, informatique et Opta LP) a aboutit à un résultat satisfaisant permettant au responsable d'atelier de gagner du temps sur la tâche d'ordonnancement. Le planning initialement prévu a été respecté et a permis d'accompagner la prise de poste du nouveau responsable d'atelier. De nombreuses fonctionnalités permettent un paramétrage complet de l'outil tout en restant facile d'utilisation et ergonomique. Il est connecté aux systèmes d'information de Petit Bateau pour recevoir les données nécessaires à l'alimentation de l'algorithme. Le logiciel est encore en cours d'amélioration pour apporter de nouvelles fonctionnalités facilitant son utilisation. Les évolutions prévues continuent d'intégrer les résultats de la recherche puisque la partie réordonnancement sera prochainement intégrée. Cela permettra de relancer le calcul du planning de production en fonction des aléas qui peuvent se produire dans l'atelier.

Chapitre 7

Conclusions et perspectives

Cette thèse issue d'une collaboration entre Petit Bateau et l'UTT, a eu pour objectif d'accompagner l'entreprise vers une modernisation de son site de Troyes à travers la mise en place d'outils d'aide à la décision. L'entreprise a à coeur de garder ce site historique de production et de valoriser le patrimoine textile et industriel qu'il abrite. Pour cela, il faut réussir à opérer un changement vers une usine plus connectée pour répondre aux nouveaux enjeux du secteur : une demande de plus en plus complexe qui demande de l'agilité et de l'innovation tout en restant compétitive et qualitative. Plusieurs problématiques ont été identifiées et traitées dans ce manuscrit. Petit Bateau a de nombreux services qui peuvent être accompagnés vers une mise en place d'outil d'aide à la décision.

Le premier chapitre a permis la présentation du contexte général. Depuis quelques années, nous avons conscience qu'une nouvelle révolution industrielle est en train de s'opérer avec l'arrivée de technologies en réseaux et intelligentes. Cette révolution, l'industrie 4.0 est détaillée dans ce chapitre. L'impact de cette révolution est particulièrement visible par les changements qui s'opèrent au niveau de la supply chain. De plus en plus de connexions se créent entre les différents acteurs et une superposition de supply chain inter connectées se met en place à chaque niveau de l'entreprise. Il n'y a plus un niveau de clients, de producteurs et de fournisseurs mais plusieurs niveaux pour chaque fonction de l'entreprise. Ce constat est également détaillé dans ce chapitre.

Une seconde partie de ce premier chapitre se consacre à l'industrie textile en France. Tout d'abord à son histoire qui a connu une forte crise dûe à la délocalisation vers les pays émergeant à la fin des années 80. L'entreprise Petit Bateau et son évolution dans ce contexte sont ensuite présentées. Ce chapitre se conclut sur les outils d'aide à la décision qui ont déjà pu être appliqués au monde du textile et à quel niveau.

Le chapitre suivant s'intéresse à un problème d'allocation dynamique de produit. Il s'agit de prendre une décision d'affectation au niveau stratégique de la supply chain. L'objectif est de déterminer quelle quantité de chaque catégorie de produit sera fabriquée sur chaque site de production pour la prochaine collection. Le modèle se base sur la minimisation des coûts de stockage, production et transport. Un modèle mathématique a été proposé pour résoudre ce problème sur des instances théoriques de la littérature et sur les instances réelles. Le modèle a également amélioré les résultats obtenus sur les instances théoriques. Sur les instances réelles, une réduction importante des coûts de transport a pu être obtenue. Cette étude propose à l'entreprise, un outil d'aide à la décision pour l'affectation des produits qui a lieu tous les 6 mois. Pour les perspectives de ce chapitre, le modèle pourrait être testé avec un objectif de maximisation du profit. Pour cela, une variable de décision supplémentaire sur le prix de vente selon le flux de production choisi peut être ajoutée. Il est également possible de faire varier le nombre de vente pour favoriser la fabrication française qui est plus attractive pour les consommateurs. Une demande variable pourrait alors être considérée.

Le chapitre 3 est consacré à la question de l'agencement de l'atelier de tricotage de l'entreprise. Constitué d'une cinquantaine de machines avec des taux d'utilisation variables, nous avons réfléchi à l'optimisation du travail des bonnetiers pour équilibrer leur charge de travail en fonction des machines qui leur sont attribuées. Les machines d'un groupe sont donc implantées de manière à les grouper dans l'espace en minimisant l'écart maximum qui pourra être parcouru par un opérateur. Un nouveau modèle mathématique a été proposé avec deux approches mises en place : une résolution agrégée puis une séquentielle. Pour résoudre les instances réelles, un algorithme génétique a été développé. Cet algorithme a permis de proposer un agencement avec des groupes de machines d'un écart de charge maximum de 24h sur 6 mois de production. Les perspectives sur cette étude sont de permettre à Petit Bateau d'intégrer l'utilisation de cet algorithme dans son processus de décision pour repenser l'atelier à chaque début de collection en fonction des besoins annoncés.

Le quatrième chapitre est la continuité du chapitre 3. Le problème d'ordonnement de la production de l'atelier tricotage y est étudié. L'atelier est composé de machines parallèles non reliées. Les caractéristiques de temps de changement dépendant de la séquence et des machines sont prises en considération ainsi que l'éligibilité des machines et les ressources limitées. Deux types de ressources sont considérées : la limitation du nombre d'opérateurs à 5, chacun limité à la supervision de 5 machines en simultané et la limitation du nombre de régleurs chacun limité à un réglage à la fois. L'objectif choisi est la minimisation de la date maxi-

mum de fin de l'ensemble de la production (makespan), car l'entreprise souhaite finir l'ensemble de la production le plus tôt possible pour libérer de la capacité pour faire des essais, des pièces types ou autres hors production. Un modèle mathématique considérant cet objectif et les différentes contraintes a été réalisé. Pour résoudre les instances de taille réelle, un algorithme génétique a été présenté. Des opérateurs propres à ce problème ont été implémentés. Suite à l'obtention de résultats concluants, un projet de création d'un logiciel d'ordonnancement a été lancé pour offrir à l'entreprise un outil d'aide à la décision facile d'utilisation.

Le chapitre 5, qui constitue une suite du chapitre 4, est dédié à la résolution du problème de réordonnancement. A la suite de l'ordonnancement de l'atelier, des aléas peuvent venir perturber le planning prévu en cours de semaine. Quatre perturbations ont été prises en compte : l'arrivée d'une tâche supplémentaire, la suppression d'une tâche, l'indisponibilité d'une machine ou l'absence d'une ressource humaine. L'intérêt de proposer un algorithme de réordonnancement est de pouvoir relancer le calcul d'un planning de production optimisé chaque fois que cela est nécessaire. L'objectif principal reste la minimisation de la date de fin maximale. Cependant, pour ne pas perturber complètement l'organisation de l'atelier, un objectif supplémentaire par rapport à l'ordonnancement est ajouté. Il s'agit de l'optimisation d'un critère de stabilité. Plusieurs combinaisons de ces objectifs ont été étudiées et comparées. Les perspectives de ce chapitre sont de présenter les résultats sous la forme d'un front de Pareto pour laisser l'arbitrage au responsable d'atelier sur la meilleure solution à mettre en place.

Pour conclure cette thèse en milieu industriel, le dernier chapitre est consacré à la mise en place concrète d'un logiciel d'ordonnancement dans l'atelier de tricotage. Ce logiciel intègre les développements scientifiques présentés dans le chapitre 4. Il s'agit d'un travail collaboratif entre un institut de recherche, l'UTT, une entreprise, Petit Bateau, et une start up local, Opta LP. Ce travail va se poursuivre pour permettre également l'intégration du travail de recherche sur le réordonnancement. De cette manière, l'outil sera complet pour permettre au responsable d'atelier de l'utiliser et de gagner en efficacité sur sa production.

Les travaux présentés ont donné lieu à plusieurs publications. Un article de revue a été soumis dans un journal international (Berthier *et al.* (2021c)). Trois articles ont été acceptés par un comité de lecture avec présentation en conférence internationale (Berthier *et al.* (2019), Berthier *et al.* (2020a) et Berthier *et al.* (2021b)). Enfin, deux présentations ont été faites en conférence internationale sans comité de lecture (Berthier *et al.* (2020b) et Berthier *et al.* (2021a)).

Ce travail de thèse donne lieu à de nombreuses perspectives :

- Étendre le travail d'optimisation de l'ordonnancement aux autres ateliers : teinture, coupe et confection. La teinture étant très dépendante du tricotage, il serait intéressant d'étudier un ordonnancement complet tricotage teinture. Cela pourrait considérablement réduire le stock d'encours entre les deux ateliers. Le tricotage serait alors une opération avec machines parallèles du flux complet. Le flux de teinture correspond à un système flow shop hybride. Plusieurs opérations peuvent avoir lieu sur des machines parallèles. Un flux réentrant est à considérer quand le produit demande une étape d'impression. Celle-ci était faite jusqu'à présent chez des sous-traitants. Une machine vient d'être acquise pour internaliser une partie de ce process.
- Étudier l'impact de la prise en compte du facteur humain dans l'ordonnancement. Nous avons choisi une approche qui considère de manière indirecte les ressources humaines. En effet, nous avons limité le nombre de machines capables de tourner en simultané. Cette contrainte vient directement des capacités humaines de l'atelier. Nous pourrions envisager de limiter le nombre d'opérations en même temps non via un nombre de machines mais via la quantité de travail que cela représente pour chaque opérateur. Nous sommes déjà capables de calculer la charge opérateur qui découle du planning d'ordonnancement établi. Il faudrait donc à présent l'intégrer en contrainte du modèle, chaque opérateur travaillant un nombre connu d'heures.
- De nouveaux sujets émergent au sein de l'entreprise auxquels la recherche pourrait répondre. Par exemple sur la qualité, il serait intéressant d'être capable de détecter le plus tôt possible l'apparition de défauts pour produire le moins possible de produits défectueux. Il serait également intéressant d'analyser les données pour identifier les causes de non qualité et pourvoir agir dessus de manière intelligente.
- Approfondir les sujets liés au fonctionnement de la chaîne logistique. L'étude que nous avons faite dans cette thèse n'a pas été appliquée. Cependant, il pourrait être intéressant de la reprendre et d'y intégrer la stratégie actuelle que prend l'entreprise. Valoriser de manière importante le "Made in France", intégrer des flux de reprises pour développer la seconde main, sourcer les fournisseurs pour choisir les plus durables, automatiser une ligne de confection pour un produit en particulier....
- Approfondir également le sujet d'agencement de l'atelier de tricotage. Le travail peut être repris sur de nouvelles données plus récentes. L'entreprise peut s'intéresser à des façon de déplacer plus facilement les métiers et ainsi rendre l'atelier plus agile en fonction des collections. Par exemple, les métiers pourraient être placés sur des plateaux à roulettes et augmenter leur mobilité. L'algorithme développé peut également être amélioré par exemple

en étudiant des opérateurs de croisement spécifiques au problème étudié et le rendre ainsi plus performant sur les temps de calcul et une convergence plus rapide.

- Approfondir le travail sur le réordonnement. Nous avons traité le problème de réordonnement en regardant l'impact du choix d'une fonction objectif définie sur deux indicateurs de performance et stabilité. Une approche multi-objectif pourrait être intéressante. Il serait possible de tracer un front de Pareto pour proposer plusieurs solutions au responsable d'atelier. Il pourrait alors choisir celle qui correspond à la réponse qu'il souhaite mettre en place dans l'atelier face à l'aléa qui est survenu.
- Mettre en place un suivi de production temps réel dans l'ensemble de l'usine. Un frein à beaucoup de projets à Petit Bateau est le manque de données pour analyser et mesurer l'existant. Cela freine les éventuelles améliorations qui pourraient être mises en place et complexifie les estimations de gain pour chaque projet mis en place. Pour le projet d'ordonnement, il s'agit d'un pré requis pour intégrer le travail qui a été fait sur le réordonnement. Mais avoir de telles données permettrait à l'ensemble des départements de profiter d'une meilleure vision du travail réalisé, d'une base de données accessible et exploitable pour faire de nombreuses analyses et prendre des décisions, développer de nouveaux outils d'aide à la décision ou encore faire appel à de l'intelligence artificielle pour traiter certaines tâches.

Bibliographie

- AFZALIRAD, M. et REZAEIAN, J. (2016). Resource-constrained unrelated parallel machine scheduling problem with sequence dependent setup times, precedence constraints and machine eligibility restrictions. *Computers & Industrial Engineering*, 98:40–52.
- ALLAHVERDI, A., GUPTA, J. N. et ALDOWAISAN, T. (1999). A review of scheduling research involving setup considerations. *Omega*, 27(2):219–239.
- ALLAHVERDI, A., NG, C., CHENG, T. E. et KOVALYOV, M. Y. (2008). A survey of scheduling problems with setup times or costs. *European journal of operational research*, 187(3):985–1032.
- AMODEO, L., PRINS, C. et SÁNCHEZ, D. R. (2009). Comparison of metaheuristic approaches for multi-objective simulation-based optimization in supply chain inventory management. In *Workshops on Applications of Evolutionary Computation*, pages 798–807. Springer.
- ANJOS, M. F. et VIEIRA, M. V. (2017). Mathematical optimization approaches for facility layout problems : The state-of-the-art and future research directions. *European Journal of Operational Research*, 261(1):1–16.
- ARNAOUT, J.-P. (2014). Rescheduling of parallel machines with stochastic processing and setup times. *Journal of Manufacturing Systems*, 33(3):376–384.
- ARNAOUT, J.-P., RABADI, G. et MUSA, R. (2010). A two-stage ant colony optimization algorithm to minimize the makespan on unrelated parallel machines with sequence-dependent setup times. *Journal of Intelligent Manufacturing*, 21(6):693–701.
- ARNTZEN, B. C., BROWN, G. G., HARRISON, T. P. et TRAFTON, L. L. (1995). Global supply chain management at digital equipment corporation. *Interfaces*, 25(1):69–93.

- ASADOLLAHI-YAZDI, E., COUZON, P., NGUYEN, N. Q., OUAZENE, Y., YALAOUI, F. *et al.* (2020). Industry 4.0 : Revolution or evolution? *American Journal of Operations Research*, 10(06):241.
- AYDINEL, M., SOWLATI, T., CERDA, X., COPE, E. *et* GERSCHMAN, M. (2008). Optimization of production allocation and transportation of customer orders for a leading forest products company. *Mathematical and Computer Modelling*, 48(7-8):1158–1169.
- AZADIVAR, F. *et* WANG, J. (2000). Facility layout optimization using simulation and genetic algorithms. *International Journal of Production Research*, 38(17): 4369–4383.
- AZIZOGLU, M. *et* ALAGÖZ, O. (2005). Parallel-machine rescheduling with machine disruptions. *IIE Transactions*, 37(12):1113–1118.
- BATTAÏA, O. *et* DOLGUI, A. (2013). A taxonomy of line balancing problems and their solution approaches. *International Journal of Production Economics*, 142(2):259–277.
- BAYBARS, I. (1986). A survey of exact algorithms for the simple assembly line balancing problem. *Management science*, 32(8):909–932.
- BAYKASOĞLU, A. *et* KARASLAN, F. S. (2017). Solving comprehensive dynamic job shop scheduling problem by using a grasp-based approach. *International Journal of Production Research*, 55(11):3308–3325.
- BECKER, C. *et* SCHOLL, A. (2006). A survey on problems and methods in generalized assembly line balancing. *European journal of operational research*, 168(3):694–715.
- BEKTUR, G. *et* SARAÇ, T. (2019). A mathematical model and heuristic algorithms for an unrelated parallel machine scheduling problem with sequence-dependent setup times, machine eligibility restrictions and a common server. *Computers & Operations Research*, 103:46–63.
- BERTHIER, A., CHEHADE, H., YALAOUI, A., BOUILLOT, C., AMODEO, L. *et* YALAOUI, F. (2020a). Case study of supply chain in textile industry : a dynamic product allocation decision problem. *In 13ème conférence internationale de Modélisation, Optimisation et Simulation (MOSIM2020), 12-14 Nov 2020, AGADIR, Maroc.*
- BERTHIER, A., YALAOUI, A., CHEHADE, H., YALAOUI, F., AMODEO, L. *et* BOUILLOT, C. (2020b). Unrelated parallel machines scheduling with setup times in textile industry. *Ola20 - Spain.*

- BERTHIER, A., YALAOUI, A., CHEHADE, H., YALAOUI, F., AMODEO, L. et BOUILLOT, C. (2021a). Rescheduling in textile industry : an unrelated parallel machines problem with setup times. *Ola21 - Italy*.
- BERTHIER, A., YALAOUI, A., CHEHADE, H., YALAOUI, F., AMODEO, L. et BOUILLOT, C. (2021b). An unrelated parallel machines rescheduling problem : An industrial case study. In *IFIP International Conference on Advances in Production Management Systems*, pages 81–91. Springer.
- BERTHIER, A., YALAOUI, A., CHEHADE, H., YALAOUI, F., AMODEO, L. et BOUILLOT, C. (2021c). Unrelated parallel machines scheduling with dependent setup times in textile industry. *CIE (submitted)*.
- BERTHIER, A., YALAOUI, A., CHEHADE, H., YALAOUI, F., AMODEO, L. et COQUELET, G. (2019). Machines group and load balancing : an industrial case. *IFAC-PapersOnLine*, 52(13):415–420.
- BITAR, A., DAUZÈRE-PÉRÈS, S. et YUGMA, C. (2021). Unrelated parallel machine scheduling with new criteria : Complexity and models. *Computers & Operations Research*, 132:105291.
- BORTOLINI, M., GALIZIA, F. G. et MORA, C. (2018). Reconfigurable manufacturing systems : Literature review and research trend. *Journal of manufacturing systems*, 49:93–106.
- BOYSEN, N., FLIEDNER, M. et SCHOLL, A. (2007). A classification of assembly line balancing problems. *European journal of operational research*, 183(2):674–693.
- CANDAN, G. et YAZGAN, H. R. (2015). Genetic algorithm parameter optimisation using taguchi method for a flexible manufacturing system scheduling problem. *International Journal of Production Research*, 53(3):897–915.
- CHANG, J.-H., RYNHART, G., HUYNH, P. *et al.* (2016). *ASEAN in transformation : textiles, clothing and footwear : refashioning the future*. ILO.
- CHEN, B., POTTS, C. N. et WOEGINGER, G. J. (1998). A review of machine scheduling : Complexity, algorithms and approximability. In *Handbook of combinatorial optimization*, pages 1493–1641. Springer.
- CHENG, T. et SIN, C. (1990). A state-of-the-art review of parallel-machine scheduling research. *European Journal of Operational Research*, 47(3):271–292.
- DAOUD, S., CHEHADE, H., YALAOUI, F. et AMODEO, L. (2014). Efficient meta-heuristics for pick and place robotic systems optimization. *Journal of Intelligent Manufacturing*, 25(1):27–41.

- DEKKERS, R. (2018). Group technology : Amalgamation with design of organisational structures. *International Journal of Production Economics*, 200:262–277.
- DELORME, X., DOLGUI, A., KOVALEV, S. et KOVALYOV, M. Y. (2019). Minimizing the number of workers in a paced mixed-model assembly line. *European Journal of Operational Research*, 272(1):188–194.
- DI PASQUALE, V., NENNI, M. E. et RIEMMA, S. (2020). Order allocation in purchasing management : a review of state-of-the-art studies from a supply chain perspective. *International Journal of Production Research*, pages 1–26.
- DOLGUI, A., KOVALEV, S., KOVALYOV, M. Y., MALYUTIN, S. et SOUKHAL, A. (2018). Optimal workforce assignment to operations of a paced assembly line. *European Journal of Operational Research*, 264(1):200–211.
- DOLGUI, A. et PROTH, J.-M. (2013). Assembly line balancing : Conventional methods and extensions. *IFAC Proceedings Volumes*, 46(9):43–48.
- DORIGO, M. et DI CARO, G. (1999). Ant colony optimization : a new metaheuristic. In *Proceedings of the 1999 congress on evolutionary computation-CEC99 (Cat. No. 99TH8406)*, volume 2, pages 1470–1477. IEEE.
- DRIRA, A., PIERREVAL, H. et HAJRI-GABOUJ, S. (2007). Facility layout problems : A survey. *Annual reviews in control*, 31(2):255–267.
- FANJUL-PEYRO, L., RUIZ, R. et PEREA, F. (2019). Reformulations and an exact algorithm for unrelated parallel machine scheduling problems with setup times. *Computers & Operations Research*, 101:173–182.
- FRAMINAN, J. M. et RUIZ, R. (2010). Architecture of manufacturing scheduling systems : Literature review and an integrated proposal. *European Journal of Operational Research*, 205(2):237–246.
- GIANNOCCARO, I. et PONTRANDOLFO, P. (2002). Inventory management in supply chains : a reinforcement learning approach. *International Journal of Production Economics*, 78(2):153–161.
- GOIN, A., CHAMPION, J.-B., COLLIN, C., GLÉNAT, P., LESDOS-CAUHAPÉ, C. et QUÉNECHDU, V. (2018). *INSEE Première*, (1714).
- GÖKALP, E., ŞENER, U. et EREN, P. E. (2017). Development of an assessment model for industry 4.0 : industry 4.0-mm. In *International Conference on Software Process Improvement and Capability Determination*, pages 128–142. Springer.
- GOLDBERG, D. E. (2006). *Genetic algorithms*. Pearson Education India.

- GRAHAM, R. L., LAWLER, E. L., LENSTRA, J. K. et KAN, A. R. (1979). Optimization and approximation in deterministic sequencing and scheduling : a survey. *In Annals of discrete mathematics*, volume 5, pages 287–326. Elsevier.
- GUINET, A. (2001). Multi-site planning : A transshipment problem. *International Journal of production economics*, 74(1-3):21–32.
- HAMZADAYI, A. et YILDIZ, G. (2017). Modeling and solving static m identical parallel machines scheduling problem with a common server and sequence dependent setup times. *Computers & Industrial Engineering*, 106:287–298.
- HASANI GOODARZI, A., ZEGORDI, S. H., ALPAN, G., NAKHAI KAMALABADI, I. et HUSSEINZADEH KASHAN, A. (2021). Reliable cross-docking location problem under the risk of disruptions. *Operational Research*, 21(3):1569–1612.
- HASSAN, M. M. (1995). Layout design in group technology manufacturing. *International Journal of Production Economics*, 38(2-3):173–188.
- HERAGU, S. S. et KAKUTURI, S. R. (1997). Grouping and placement of machine cells. *IIE transactions*, 29(7):561–571.
- HIDAYATNO, A., RAHMAN, I. et IRMINANDA, K. R. (2019). A conceptualization of industry 4.0 adoption on textile and clothing sector in indonesia. *In Proceedings of the 2019 5th International Conference on Industrial and Business Engineering*, pages 339–343.
- HOLLAND, J. H. *et al.* (1992). *Adaptation in natural and artificial systems : an introductory analysis with applications to biology, control, and artificial intelligence*. MIT press.
- HU, T. C. (1961). Parallel sequencing and assembly line problems. *Operations research*, 9(6):841–848.
- JIANG, S., ONG, Y.-S., ZHANG, J. et FENG, L. (2014). Consistencies and contradictions of performance metrics in multiobjective optimization. *IEEE transactions on cybernetics*, 44(12):2391–2404.
- JOO, C. M. et KIM, B. S. (2015). Hybrid genetic algorithms with dispatching rules for unrelated parallel machine scheduling with setup time and production availability. *Computers & Industrial Engineering*, 85:102–109.
- KIM, Y.-I. et KIM, H.-J. (2020). Rescheduling of unrelated parallel machines with job-dependent setup times under forecasted machine breakdown. *International Journal of Production Research*, pages 1–23.

- KIRKPATRICK, S., GELATT, C. D. et VECCHI, M. P. (1983). Optimization by simulated annealing. *science*, 220(4598):671–680.
- KOCH, V., KUGE, S., GEISSBAUER, R. et SCHRAUF, S. (2014). Industry 4.0 : Opportunities and challenges of the industrial internet. *Strategy & PwC*, pages 5–50.
- KOOPMANS, T. C. et BECKMANN, M. (1957). Assignment problems and the location of economic activities. *Econometrica : journal of the Econometric Society*, pages 53–76.
- KOREN, Y. (2010). *The global manufacturing revolution : product-process-business integration and reconfigurable systems*, volume 80. John Wiley & Sons.
- KUSIAK, A. (1987). The generalized group technology concept. *International journal of production research*, 25(4):561–569.
- KÜSTERS, D., PRASS, N. et GLOY, Y.-S. (2017). Textile learning factory 4.0—preparing germany’s textile industry for the digital future. *Procedia Manufacturing*, 9:214–221.
- LEE, Y. H. et LEE, M. H. (2002). A shape-based block layout approach to facility layout problems using hybrid genetic algorithm. *Computers & Industrial Engineering*, 42(2-4):237–248.
- LI, K. et YANG, S.-I. (2009). Non-identical parallel-machine scheduling research with minimizing total weighted completion times : Models, relaxations and algorithms. *Applied mathematical modelling*, 33(4):2145–2158.
- LIU, C., KOU, G., ZHOU, X., PENG, Y., SHENG, H. et ALSAADI, F. E. (2020). Time-dependent vehicle routing problem with time windows of city logistics with a congestion avoidance approach. *Knowledge-Based Systems*, 188:104813.
- LIU, Z., LU, L. et QI, X. (2018). Cost allocation in rescheduling with machine unavailable period. *European Journal of Operational Research*, 266(1):16–28.
- MA, Z., YANG, Z., LIU, S. et WU, S. (2018). Optimized rescheduling of multiple production lines for flowshop production of reinforced precast concrete components. *Automation in Construction*, 95:86–97.
- MARKHAM, S. K. (2002). Moving technologies from lab to market. *Research-technology management*, 45(6):31–42.
- MCNAUGHTON, R. (1959). Scheduling with deadlines and loss functions. *Management Science*, 6(1):1–12.

-
- MELLER, R. D., NARAYANAN, V. et VANCE, P. H. (1998). Optimal facility layout design1. *Operations Research Letters*, 23(3-5):117–127.
- MÉNDEZ-VÁZQUEZ, Y. M. et NEMBARD, D. A. (2018). Worker-cell assignment : The impact of organizational factors on performance in cellular manufacturing systems. *Computers & Industrial Engineering*.
- MITROFANOV, S. (1983). Group technology in industry. *Leningard : Mashinostroenie in Russian*.
- MOHAN, J., LANKA, K. et RAO, A. N. (2019). A review of dynamic job shop scheduling techniques. *Procedia Manufacturing*, 30:34–39.
- NGUYEN, N. Q. (2017). *Electric Vehicles Charging Scheduling Optimisation*. Thèse de doctorat, Troyes.
- NGUYEN, N.-Q., YALAOUI, F., AMODEO, L. et CHEHADE, H. (2018). A large neighborhood search heuristic for the cumulative scheduling problem with time-dependent resource availability. *In Asian Conference on Intelligent Information and Database Systems*, pages 707–715. Springer.
- NGUYEN, N.-Q., YALAOUI, F., AMODEO, L., CHEHADE, H. et TOGGENBURGER, P. (2016). Solving a malleable jobs scheduling problem to minimize total weighted completion times by mixed integer linear programming models. *In Asian Conference on Intelligent Information and Database Systems*, pages 286–295. Springer.
- OUAZENE, Y., YALAOUI, F., CHEHADE, H. et YALAOUI, A. (2014). Workload balancing in identical parallel machine scheduling using a mathematical programming method. *International Journal of Computational Intelligence Systems*, 7(sup1):58–67.
- PANICKER, V. V., VANGA, R. et SRIDHARAN, R. (2013). Ant colony optimisation algorithm for distribution-allocation problem in a two-stage supply chain with a fixed transportation charge. *International journal of production research*, 51(3): 698–717.
- PAPAIIOANNOU, G. et WILSON, J. M. (2010). The evolution of cell formation problem methodologies based on recent studies (1997–2008) : Review and directions for future research. *European journal of operational research*, 206(3):509–521.
- PARSANEJAD, A. et NAYEBI, M. A. (2020). An applied intelligent fuzzy assignment approach for supply chain facilities. *Journal of Applied Intelligent Systems and Information Sciences*, 1(1):50–59.

- PELLERIN, R., PERRIER, N. et BERTHAUT, F. (2020). A survey of hybrid metaheuristics for the resource-constrained project scheduling problem. *European Journal of Operational Research*, 280(2):395–416.
- PENTICO, D. W. (2007). Assignment problems : A golden anniversary survey. *European Journal of Operational Research*, 176(2):774–793.
- PFEIFFER, A., KÁDÁR, B. et MONOSTORI, L. (2006). Stability-oriented evaluation of hybrid rescheduling methods in a job-shop with machine breakdowns. *Proceedings of the 39th CIRP ISMS*, pages 173–178.
- PFUND, M., FOWLER, J. W. et GUPTA, J. N. (2004). A survey of algorithms for single and multi-objective unrelated parallel-machine deterministic scheduling problems. *Journal of the Chinese Institute of Industrial Engineers*, 21(3):230–241.
- PRODUKTIVITI, L., SULTAN, J. et JAYA, P. (2018). MALAYSIA PRODUCTIVITY CORPORATION. page 38.
- RABADI, G., MORAGA, R. J. et AL-SALEM, A. (2006). Heuristics for the unrelated parallel machine scheduling problem with setup times. *Journal of Intelligent Manufacturing*, 17(1):85–97.
- ROCHA, P. L., RAVETTI, M. G., MATEUS, G. R. et PARDALOS, P. M. (2008). Exact algorithms for a scheduling problem with unrelated parallel machines and sequence and machine-dependent setup times. *Computers & Operations Research*, 35(4):1250–1264.
- ROSSIT, D. A., TOHMÉ, F. et FRUTOS, M. (2019). Industry 4.0 : smart scheduling. *International Journal of Production Research*, 57(12):3802–3813.
- RUIZ, R. et MAROTO, C. (2006). A genetic algorithm for hybrid flowshops with sequence dependent setup times and machine eligibility. *European journal of operational research*, 169(3):781–800.
- RUSZCZYŃSKI, A. et SHAPIRO, A. (2003). Stochastic programming models. *Handbooks in operations research and management science*, 10:1–64.
- SCHOLL, A. (1999). Balancing and sequencing of assembly lines (contributions to management science).
- SCHOLL, A. et BECKER, C. (2006). State-of-the-art exact and heuristic solution procedures for simple assembly line balancing. 168(3):666–693.

-
- SELIM, H. M., ASKIN, R. G. et VAKHARIA, A. J. (1998). Cell formation in group technology : review, evaluation and directions for future research. *Computers & Industrial Engineering*, 34(1):3–20.
- SHAPIRO, J. F. (2004). Challenges of strategic supply chain planning and modeling. *Computers & Chemical Engineering*, 28(6-7):855–861.
- SHAYAN, E. et CHITILAPPILLY, A. (2004). Genetic algorithm for facilities layout problems based on slicing tree structure. *International Journal of Production Research*, 42(19):4055–4067.
- SUN, J. U. (2007). A taguchi approach to parameter setting in a genetic algorithm for general job shop scheduling problem. *IEMS*, 6(2):119–124.
- SUN, L., LUAN, F. et PIAN, J. (2015). An effective approach for the scheduling of refining process with uncertain iterations in steel-making and continuous casting process. *IFAC-PapersOnLine*, 48(3):1966–1972.
- SURESH, V. et CHAUDHURI, D. (1994). Minimizing maximum tardiness for unrelated parallel machines. *International Journal of Production Economics*, 34(2):223–229.
- TALBI, E.-G. (2020). Machine learning into metaheuristics : A survey and taxonomy of data-driven metaheuristics.
- TAMSSAOUET, K., DAUZÈRE-PÉRÈS, S. et YUGMA, C. (2018). Metaheuristics for the job-shop scheduling problem with machine availability constraints. *Computers & Industrial Engineering*, 125:1–8.
- TAVAKKOLI-MOGHADDAM, R., TAHERI, F., BAZZAZI, M., IZADI, M. et SASANI, F. (2009). Design of a genetic algorithm for bi-objective unrelated parallel machines scheduling with sequence-dependent setup times and precedence constraints. *Computers & Operations Research*, 36(12):3224–3230.
- TSIAKIS, P. et PAPAGEORGIU, L. G. (2008). Optimal production allocation and distribution supply chain networks. *International Journal of Production Economics*, 111(2):468–483.
- VALENTE, L. F., BARROS, A. C., MAIA, C. et CUNHA, J. P. (2018). Start-ups : Integrating product, market and supply chain decisions to build-up market entry capabilities.
- VALLADA, E. et RUIZ, R. (2011). A genetic algorithm for the unrelated parallel machine scheduling problem with sequence dependent setup times. *European Journal of Operational Research*, 211(3):612–622.

- WEMMERLÖV, U. et HYER, N. L. (1989). Cellular manufacturing in the us industry : a survey of users. *The international journal of production research*, 27(9):1511–1530.
- WENG, M. X., LU, J. et REN, H. (2001). Unrelated parallel machine scheduling with setup consideration and a total weighted completion time objective. *International journal of production economics*, 70(3):215–226.
- WU, L. et WANG, S. (2018). Exact and heuristic methods to solve the parallel machine scheduling problem with multi-processor tasks. *International Journal of Production Economics*, 201:26–40.
- YALAOUI, F. et CHU, C. (2003). An efficient heuristic approach for parallel machine scheduling with job splitting and sequence-dependent setup times. *IIE Transactions*, 35(2):183–190.
- YALAOUI, F. et OUAZENE, Y. (2020). L’industrie du futur une réponse au monde du textile. *Chaire connected Innovation*.
- YILMAZ EROGLU, D. et OZMUTLU, H. (2017). Solution method for a large-scale loom scheduling problem with machine eligibility and splitting property. *The Journal of The Textile Institute*, 108(12):2154–2165.
- YILMAZ EROGLU, D., OZMUTLU, H. C. et OZMUTLU, S. (2014). Genetic algorithm with local search for the unrelated parallel machine scheduling problem with sequence-dependent set-up times. *International Journal of Production Research*, 52(19):5841–5856.
- YIN, J., LI, T., CHEN, B. et WANG, B. (2011). Dynamic rescheduling expert system for hybrid flow shop with random disturbance. *Procedia Engineering*, 15:3921–3925.
- ZHANG, S. et WONG, T. N. (2017). Flexible job-shop scheduling/rescheduling in dynamic environment : a hybrid mas/aco approach. *International Journal of Production Research*, 55(11):3173–3196.
- ZHU, X. et WILHELM, W. E. (2006). Scheduling and lot sizing with sequence-dependent setup : A literature review. *IIE transactions*, 38(11):987–1007.

Alice BERTHIER

Doctorat : Optimisation et Sûreté des Systèmes

Année 2021

Transition vers une usine 4.0 grâce à l'utilisation d'outils d'aide à la décision dans le secteur textile

Les travaux présentés dans cette thèse ont été motivés par les besoins de l'entreprise textile Petit Bateau. L'entreprise s'ouvre aux enjeux de l'industrie 4.0. Engager cette thèse fut un moyen de s'y inscrire, en étudiant la mise en place de nouveaux outils d'aide à la décision. Le contexte de l'entreprise offre une grande variété de sujets originaux et stimulants dans le domaine de la recherche opérationnelle. Le premier problème traité est un celui d'allocation dynamique des produits sur la chaîne logistique. Plusieurs sites peuvent être éligibles pour fabriquer chaque produit. Un modèle a été proposé pour optimiser l'affectation en minimisant les coûts (stockage, production et transports). Le second est un problème d'agencement dynamique de l'atelier de tricotage. L'optimisation du positionnement des machines dans l'atelier en fonction de leur utilisation est apparue comme un pré requis avant de proposer une résolution au problème d'ordonnement de ce même atelier. L'atelier est composé de machines parallèles non reliées avec plusieurs contraintes spécifiques. Pour aller plus loin et s'adapter aux imprévus courants dans un atelier de production, le réordonnement a également été étudié. La mise en place dans l'entreprise de chacune des solutions étudiées est abordée dans la thèse. Les limites terrain qui ne l'ont éventuellement pas permise sont expliquées mais également les succès obtenus, notamment la production d'un logiciel d'ordonnement à présent utilisé par le responsable de l'atelier.

Mots clés : industrie, informatique – production, planification – métaheuristiques – prise de décision.

Transition to a 4.0 Industry through the Use of Decision Support Tools in the Textile Field

This thesis presents works motivated by the evolution objective of the textile company Petit Bateau. The company starts to see the importance of the stakes of the Industry 4.0. Begin this thesis was a step to go in this direction with the development of decision tools. The company context offers a large variety of original and challenging studies in operational research. The first problem is a dynamic products allocation problem on the logistic supply chain. Several sites can be selected to process different products. A mathematical model is proposed to optimize the allocation by minimizing the total cost (inventory, production and transport costs). The second one is a dynamic layout problem of the knitting workshop. The layout optimization relative to the utilization rate of each machine seems to be a prerequisite before the resolution of the scheduling problem of this identical workshop. The workshop is composed of unrelated parallel machines with several specific constraints. To go further, the rescheduling problem is studied to take into consideration disturbances that can occur during production. The feasibility in the company of each solution studied is presented. The constraints on field that not allowed it are explained but also the success obtained. Such as the production of a scheduling software nowadays used by the workshop manager.

Keywords: industries, data processing – production planning – metaheuristics – decision making.

Thèse réalisée en partenariat entre :

