



**HAL**  
open science

# Ordonnancement de la production des repas d'un hôpital dans un contexte d'amélioration du bien-être au travail

Fatima Abderrabi

## ► To cite this version:

Fatima Abderrabi. Ordonnancement de la production des repas d'un hôpital dans un contexte d'amélioration du bien-être au travail. Gestion et management. Université de Technologie de Troyes, 2021. Français. NNT : 2021TROY0036 . tel-03810710

**HAL Id: tel-03810710**

**<https://theses.hal.science/tel-03810710v1>**

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

**Fatima ABDERRABI**

# Ordonnancement de la production des repas d'un hôpital dans un contexte d'amélioration du bien-être au travail

**Champ disciplinaire :**  
Sciences pour l'Ingénieur

2021TROY0036

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*

**Fatima ABDERRABI**

*le 19 novembre 2021*

---

---

**Ordonnancement de la production des repas d'un hôpital  
dans un contexte d'amélioration du bien-être au travail**

---

---

**JURY**

M. F. YALAOUI	PROFESSEUR DES UNIVERSITES	Président
M. H. ALLAOUI	PROFESSEUR DES UNIVERSITES	Rapporteur
Mme N. SAUER	PROFESSEURE DES UNIVERSITES	Rapporteuse
M. W. RAMDANE CHERIF-KHETTAF	MAITRE DE CONFERENCES	Examineur
M. E.-G. TALBI	PROFESSEUR DES UNIVERSITES	Examineur
M. M. GODICHAUD	MAITRE DE CONFERENCES	Directeur de thèse
Mme A. YALAOUI	MAITRE DE CONFERENCES - HDR	Directrice de thèse

**Personnalités invitées**

M. L. AMODEO	PROFESSEUR DES UNIVERSITES
M. P. BLUA	DIRECTEUR DES HOPITAUX DE CHAMPAGNE-SUD
M. A. QERIMI	DIRECTEUR DES ACHATS ET DE LA LOGISTIQUE DES HOPITAUX DE CHAMPAGNE-SUD

---

*À la mémoire de mon père  
À ma mère  
À ma soeur  
À tous ceux qui me sont chers*



# Remerciements

Les travaux présentés dans cette thèse ont été réalisés dans le cadre d'une convention CIFRE avec le Centre Hospitalier de Troyes (CHT) en collaboration avec l'Université de Technologie de Troyes (UTT).

Je tiens à remercier vivement en premier lieu mes directeurs de thèse, Dr. Alice YALAOUI, Maître de Conférences HDR à l'Université de Technologie de Troyes et Dr. Matthieu GODICHAUD, Maître de Conférences à l'Université de Technologie de Troyes, de m'avoir encadrée au cours de ces trois années. Je les remercie tout particulièrement et je leur exprime ma très profonde reconnaissance et gratitude pour leur disponibilité, leur aide scientifique et pour m'avoir aiguillée dans mes travaux de recherche. Leurs connaissances, leurs expertises, leurs conseils constructifs et avisés m'ont permis de mener ce travail à terme.

Mes très sincères remerciements s'adressent aux Pr. Farouk YALAOUI, Professeur à l'Université de Technologie de Troyes et Pr. Lionel AMODEO, Professeur à l'Université de Technologie de Troyes, de m'avoir confiée ce projet et accueillie au sein de leur équipe. Mes plus vifs remerciements pour leur implication, leur disponibilité et tout le temps accordé à mon égard. Je tiens à leur témoigner ma très profonde reconnaissance et gratitude. Je remercie également Pr. Farouk YALAOUI pour l'honneur qu'il me fait en participant à mon jury de thèse.

Toute ma reconnaissance se porte aux Pr. Nathalie SAUER, Professeur à l'Université de Lorraine et Pr. Hamid ALLAOUI, Professeur à l'Université d'Artois, pour l'honneur qu'ils me font en ayant accepté d'être rapporteurs de cette thèse.

J'exprime toute ma gratitude aux Dr. Wahiba RAMDANE CHERIF-KHETTAF, Maître de Conférences à l'École Nationale Supérieure des Mines de Nancy et Pr. El-Ghazali TALBI, Professeur à l'École Polytechnique Universitaire de Lille, d'avoir accepté d'examiner le présent travail et pour leur participation au jury.

J'exprime mes sincères remerciements à Mr. Philippe BLUA, Directeur des Hôpitaux Champagne-Sud, pour sa disponibilité, son accompagnement et son intérêt pour ce projet de thèse.

Je remercie Mr. Ardian QERIMI, Directeur des Achats et de la Logistique, pour l'intérêt qu'il a porté à ce projet.

Je tiens à remercier particulièrement et à témoigner ma gratitude à Mr. Éric THIVET, ex-Responsable Logistique, pour l'aide et les conseils pertinents concernant les missions évoquées dans ce projet de thèse, pour sa disponibilité, son intérêt, ainsi que le temps et le soutien qu'il m'a accordés.

Je souhaite aussi présenter mes remerciements et exprimer toute ma gratitude à Mr. Jérôme FEVRIER, Responsable du Service de Restauration pour son accueil à l'Unité Centrale de Production Alimentaire, pour sa disponibilité et pour tout le temps qu'il m'a accordé pour répondre à toutes mes questions, ainsi que pour les moyens qu'il a mis en œuvre pour me donner accès au terrain. Je remercie également profondément tout le personnel de la cuisine centrale pour leur aide précieuse dans la phase de recueil des données sur le terrain.

Un remerciement du plus profond du cœur et une énorme pensée à mon feu père, j'espère que du monde qui est sien maintenant, il apprécie cet humble geste comme preuve de reconnaissance de la part de sa fille qui ne l'a jamais oublié. C'est à toi que je dédie particulièrement cette thèse. Tu attendais avec impatience le jour de ma soutenance, pardonne-moi de ne pas l'avoir finie le temps de ton vivant. J'aurais tellement aimé et souhaité que tu sois là aujourd'hui pour voir où je me suis rendue. Que ton âme repose en paix.

Je remercie du fond du cœur la personne à qui je dédie cette thèse, la personne qui est là depuis toujours. Un énorme merci ma mère, d'avoir toujours été à mes côtés, de m'avoir toujours soutenue et encouragée, d'avoir toujours été si fière de moi et d'avoir toujours cru en moi. Merci d'avoir toujours été une oreille attentive et d'être toujours présente et disponible à tout moment. Aucun mot ne saurait exprimer mon amour éternel et ma considération pour les sacrifices que tu as consentis pour mon instruction et mon bien-être.

Je tiens à remercier également ma très chère unique sœur Khadidja, pour son encouragement et son soutien inconditionnels et indéfectibles surtout dans les moments difficiles. Merci d'avoir su m'épauler et trouver les mots dont j'avais besoin.

Un remerciement tout spécial à la famille BENZAADI, ma tante Khaldia, mon oncle Zinedine, ainsi que mes cousines Fazia, Linda, Sonya et Camille, pour leurs soutien et encouragement.

Enfin, je tiens à remercier tous mes collègues du laboratoire LIST3N, le personnel du secrétariat du département ROSAS et de l'école doctorale.

# Résumé

Les travaux menés dans le cadre de cette thèse, ont été motivés par une problématique issue du domaine hospitalier portant sur l'optimisation de la chaîne logistique alimentaire du centre hospitalier de Troyes (CHT). Le CHT a mis en place des mesures importantes afin de répondre efficacement aux besoins des patients et pour améliorer les conditions de travail et le bien-être des employés. La contribution du présent travail consiste à déterminer le meilleur plan pour répondre aux demandes des clients en matière de repas et de proposer des axes et des pistes pour améliorer le bien-être au travail. L'objectif est de fournir des outils d'aide à la décision pour l'optimisation et la réorganisation de la chaîne logistique alimentaire en accordant une attention particulière au facteur humain. Le problème étudié est de type job-shop flexible avec setups dépendants des séquences et fractionnement des tâches en lots en présence de différents types de ressources. Le critère d'optimisation étudié est la minimisation du temps de présence total des tâches dans le système de production. Un nouveau modèle mathématique et des métaheuristiques hybrides basées sur des algorithmes génétiques et des méthodes de recherche locale itérative combinées avec des recherches locales ont été développés. Les résultats d'implémentation de ces méthodes ont prouvé leur efficacité pour l'ordonnancement des processus de production alimentaire et ont permis des améliorations significatives de l'organisation réelle et de la performance du système de production étudié.

**Mots-clés :** Hôpitaux - Services de restauration, Bien-être, Ordonnancement (gestion), Modèles mathématiques, Métaheuristiques, Heuristiques.



# Abstract

The research work carried out within the framework of this thesis was motivated by a real problem issued from the hospital field relating to the optimization of the food supply chain processes of the hospital of Troyes. The Troyes hospital center has implemented important measures to effectively meet the demands of patients and to improve working conditions and employee's well-being. The contribution of the present work consists in determining the best plan to meet the customers' demands in matters of meals and to propose axes and tracks to improve the well-being of the catering service employees. The objective is to provide methods and decision support tools for optimizing and reorganizing the food supply chain with particular attention to the human factor. The studied problem in this thesis is considered as a flexible job-shop with sequence-dependent setup times and splitting of jobs in batches with the presence of different types of resources. The studied optimization criterion is the minimization of the total flow time. A new mathematical model and hybrid metaheuristics have been developed based on genetic algorithms and iterative local search methods combined with local searches. The implementation results of these methods proved their effectiveness for the scheduling of food production processes and allowed significant improvements in the real organization and the performance of the studied production system.

**Keywords** : Hospitals - Food service, Human comfort, Production scheduling, Mathematical models, Metaheuristics, Heuristics.



# Table des matières

<b>Remerciements</b>	<b>iii</b>
<b>Résumé</b>	<b>v</b>
<b>Abstract</b>	<b>vii</b>
<b>Table des matières</b>	<b>viii</b>
<b>Liste des tableaux</b>	<b>x</b>
<b>Liste des figures</b>	<b>xiii</b>
<b>Introduction générale</b>	<b>1</b>
<b>1 Contexte général de l'étude</b>	<b>7</b>
1.1 Introduction . . . . .	7
1.2 Présentation du centre hospitalier de Troyes . . . . .	8
1.3 Projet de recherche CHT-UTT . . . . .	15
1.3.1 Contexte du projet . . . . .	15
1.3.2 Objectifs et enjeux . . . . .	16
1.3.3 Étude empirique . . . . .	16
1.3.4 Problématiques . . . . .	16
1.3.5 Verrous scientifiques et techniques . . . . .	19
1.3.6 Méthodologie et démarche . . . . .	19
1.4 Présentation du service de restauration et la cuisine centrale . . . . .	20
1.5 Le système de restauration et organisation de la production . . . . .	27
1.5.1 Typologie de clientèle . . . . .	27
1.5.2 Typologie des prestations . . . . .	28
1.5.3 Typologie des produits matières premières . . . . .	30
1.5.4 Concept de production . . . . .	32
1.5.5 Environnement technologique . . . . .	33
1.6 Le système organisationnel de production des repas . . . . .	35
1.6.1 Élaboration d'un plan alimentaire et des plans de menus . . . . .	36
1.6.2 Création des plannings de production et des prévisionnels . . . . .	37
1.6.3 Passation des commandes de matières premières . . . . .	39
1.6.4 Passation des commandes de repas . . . . .	40
1.6.5 Réception et circuits-courts . . . . .	40
1.6.6 Traitement primaire des produits . . . . .	41

1.6.7	Préparation froide et production chaude . . . . .	42
1.6.8	Conditionnement, refroidissement et stockage PCEA . . . . .	43
1.6.9	Allotissement et expédition . . . . .	44
1.7	Conclusion . . . . .	44
<b>2</b>	<b>État de l'art</b> . . . . .	<b>47</b>
2.1	Introduction . . . . .	47
2.2	Les facteurs humains dans les systèmes de production et logistiques . . . . .	48
2.3	Modélisation des facteurs humains dans les systèmes de production et logistiques . . . . .	49
2.4	Aperçu de revue de littérature . . . . .	52
2.4.1	Planification et affectation des ressources humaines . . . . .	55
2.4.2	Équilibrage des chaînes d'assemblage et de production . . . . .	57
2.4.3	Rotation des tâches et des postes de travail . . . . .	58
2.5	Planification et ordonnancement des processus de production alimentaire . . . . .	64
2.6	Étude bibliographique sur le FJSP . . . . .	67
2.7	Modèles mathématiques pour le FJSP . . . . .	70
2.8	Schémas de codage et représentation des solutions pour le FJSP . . . . .	76
2.9	Conclusion . . . . .	83
<b>3</b>	<b>Modélisation mathématique</b> . . . . .	<b>85</b>
3.1	Introduction . . . . .	85
3.2	Description du problème et notations . . . . .	85
3.2.1	Hypothèses . . . . .	91
3.2.2	Notations . . . . .	92
3.2.3	Variables de décision . . . . .	93
3.3	Modèle mathématique pour le FJSP-SDST-JS-MTMR . . . . .	94
3.4	Résultats d'implémentation du modèle mathématique . . . . .	97
3.5	Discussion des résultats expérimentaux . . . . .	99
3.6	Conclusion . . . . .	100
<b>4</b>	<b>Méthodes d'optimisation</b> . . . . .	<b>101</b>
4.1	Introduction . . . . .	101
4.2	Représentation des solutions pour le FJSP-SDST-JS-MTMR . . . . .	103
4.3	Architecture d'un algorithme génétique pour le FJSP-SDST-JS-MTMR . . . . .	104
4.3.1	Population initiale . . . . .	104
4.3.2	Opérateur de sélection . . . . .	112
4.3.3	Opérateurs de croisement . . . . .	112
4.3.4	Opérateurs de mutation . . . . .	117
4.3.5	Méthodes de recherche locale . . . . .	119
4.4	Architecture d'un algorithme de recherche locale itérative pour le FJSP-SDST-JS-MTMR . . . . .	124
4.4.1	Génération de la solution initiale . . . . .	125
4.4.2	Procédure de recherche locale . . . . .	125
4.4.3	Opérateur d'affectation AO . . . . .	126
4.4.4	Opérateur de séquençement SO . . . . .	127
4.4.5	Procédure de perturbation . . . . .	130
4.5	Conclusion . . . . .	135

<b>5</b>	<b>Résultats expérimentaux</b>	<b>137</b>
5.1	Introduction . . . . .	137
5.2	Génération des données et construction des instances . . . . .	137
5.3	Performance des heuristiques de génération des solutions initiales . . . . .	138
5.4	Évaluation de performance des opérateurs développés . . . . .	143
5.5	Optimisation et réglage des paramètres par des plans d'expériences de Taguchi . . . . .	146
5.6	Caractéristiques du problème FJSP-SDST-JS-MTMR . . . . .	153
5.7	Résultats numériques . . . . .	163
5.8	Discussion des résultats numériques . . . . .	165
5.9	Conclusion . . . . .	166
<b>6</b>	<b>Application industrielle</b>	<b>169</b>
6.1	Introduction . . . . .	169
6.2	Démarche de recueil de données . . . . .	169
6.3	Traitement des données et exportation des résultats . . . . .	174
6.4	Tests sur des journées réelles de production . . . . .	177
6.5	Étude de l'impact d'intégration des temps de pause . . . . .	179
6.6	Métriques de similarité pour la stabilité des solutions . . . . .	181
6.7	Conclusion . . . . .	186
	<b>Conclusion générale</b>	<b>187</b>
	<b>Annexes</b>	<b>193</b>
A.1	Sondages sur le bien-être au travail . . . . .	193
A.2	Schéma de l'Unité Centrale de Production Alimentaire . . . . .	194
A.3	Organigramme de l'UCPA . . . . .	196
A.4	Organisation du service de restauration . . . . .	197
A.5	Schéma directeur de fonctionnement . . . . .	199
A.6	Processus de prise de décisions pour la production des repas . . . . .	200
A.7	Exemple de plan alimentaire . . . . .	200
A.8	Exemple de plan de menu . . . . .	201
A.9	Exemple de fiche technique . . . . .	202
A.10	Prestation alimentaire pour le restaurant du personnel . . . . .	203
A.11	Exemples de plannings de production des repas . . . . .	204
A.12	Planning de conditionnement . . . . .	206
A.13	Planning d'expédition des repas . . . . .	206
A.14	Exemple de plateau de repas servi aux patients . . . . .	207
A.15	Ressources matérielles de cuisson . . . . .	207
A.16	Schémas illustratifs du prétraitement, conditionnement et allotissement . . . . .	208
A.17	Résultats bruts de recueil de données sur terrain . . . . .	209
A.18	Plannings d'organisation des journées de production . . . . .	212
A.19	Taux d'occupation des machines . . . . .	213
A.20	Remplissage des données d'entrée . . . . .	216
A.21	Exportation des résultats . . . . .	217
A.22	Exemple d'une instance réelle de production . . . . .	218
A.23	Exemple de planning de production d'une instance réelle . . . . .	219
	<b>Bibliographie</b>	<b>221</b>

# Liste des tableaux

1.1	Indicateurs du bien-être au travail. . . . .	17
1.2	Quantités des plats produits par jour sur un exemple d'une semaine de production. . . . .	19
1.3	Nombre moyen de repas produits par jour de production sur un exemple d'une semaine de production. . . . .	21
1.4	Nombre moyen de repas stockés en chambre froide PCEA sur un exemple d'une semaine de production. . . . .	22
1.5	Jour de production pour jour de consommation des repas. . . . .	38
1.6	Planning de planification de la production. . . . .	38
1.7	Planning de réception et livraison des matières premières sur 5 jours du lundi au vendredi. . . . .	39
1.8	Planning de pré-traitement des matières premières. . . . .	41
2.1	Synthèse bibliographique sur des travaux de recherche portant sur la prise en compte du facteur humain dans les systèmes de production. . . . .	63
2.2	Synthèse bibliographique sur les problèmes d'ordonnancement des processus de production alimentaire. . . . .	64
2.3	Travaux de recherche sur les problèmes job-shop flexibles avec minimisation du flow time. . . . .	69
2.4	Exemple d'un FJSP pour illustrer le schéma de codage OSS. . . . .	78
2.5	Exemple de FJSP à contrainte de ressource unique. . . . .	82
3.1	Paramètres des instances générées aléatoirement de type CHT. . . . .	98
3.2	Paramètres des instances générées aléatoirement. . . . .	98
3.3	Résultats du MILP sur des instances générées aléatoirement du type CHT. . . . .	98
3.4	Résultats du MILP sur des instances générées aléatoirement de petites tailles. . . . .	98
3.5	Résultats du MILP sur des instances réelles du CHT. . . . .	99
3.6	Résultats du MILP sur des instances générées aléatoirement de grandes tailles. . . . .	99
3.7	Résultats du MILP sur des instances adaptées de la littérature. . . . .	99
4.1	Exemple de FJSP avec setups séquence-dépendants. . . . .	105
4.2	Déroulement des heuristiques d'affectation RA, SPTA et LPTA. . . . .	106
4.3	Affectations initiales par MMWA tenant compte des temps de traitement des opérations. . . . .	106
4.4	Affectations initiales par MMWA tenant compte des temps de traitement des opérations, des setup times des machines et leurs temps de préparation. . . . .	107
4.5	Déroulement des heuristiques de séquençement RS, SPTS et MNOR. . . . .	108
4.6	Séquençement initial des opérations par l'heuristique MWR basé sur l'affectation donnée dans la Table 4.4. . . . .	108
4.7	Déroulement de la recherche locale par affectation intelligente des opérations. . . . .	121
5.1	Paramètres du GA 1 et niveaux du plan de Taguchi. . . . .	148
5.2	Paramètres du GA 2 et niveaux du plan de Taguchi. . . . .	148
5.3	Résultats expérimentaux du plan de Taguchi GA 1. . . . .	148
5.4	Résultats expérimentaux du plan de Taguchi GA 2. . . . .	149
5.5	Paramètres optimaux de GA 1. . . . .	150
5.6	Paramètres optimaux de GA 2. . . . .	150
5.7	Paramètres ILS 1 et niveaux du plan de Taguchi. . . . .	150
5.8	Paramètres ILS 2 et niveaux du plan de Taguchi. . . . .	150
5.9	Résultats expérimentaux du plan de Taguchi ILS 1. . . . .	151
5.10	Résultats expérimentaux du plan de Taguchi ILS 2. . . . .	152
5.11	Paramètres optimaux ILS 1. . . . .	153
5.12	Paramètres optimaux ILS 2. . . . .	153
5.13	Exemple de cas avec 6 tâches et 4 machines. . . . .	158

5.14	Résultats des méthodes de résolution développées sur des instances réelles du CHT. . . . .	163
5.15	Résultats des méthodes de résolution développées sur des instances générées aléatoirement de type CHT. . . . .	163
5.16	Résultats des méthodes de résolution développées sur des instances générées aléatoirement de petites tailles. . . . .	164
5.17	Résultats des méthodes de résolution développées sur des instances générées aléatoirement de grandes tailles. . . . .	164
5.18	Résultats des méthodes de résolution développées sur des instances adaptées de la littérature. . . . .	164
6.1	Postes de production chaude et conditionnement chaud. . . . .	171
6.2	Poste de refroidissement. . . . .	171
6.3	Postes de production froide et conditionnement froid. . . . .	171
6.4	Compatibilité entre les plats d'une instance réelle de production. . . . .	173
6.5	Historiques des demandes imprévues : poste de production froide. . . . .	174
6.6	Historiques des demandes imprévues : poste de production chaude. . . . .	174
6.7	Importation et stock des données brutes d'une instance dans un fichier Excel. . . . .	175
6.8	Poste de production froide. . . . .	176
6.9	Poste de production chaude. . . . .	176
6.10	Exemple de planning d'une journée de production obtenu avec l'algorithme génétique. . . . .	176
6.11	Suivi du déroulement d'une journée test de production et collecte des temps opératoires réels. . . . .	177
6.12	Résultats de comparaison entre les solutions réelles et les solutions de l'algorithme génétique sur des journées réelles de production. . . . .	178
6.13	Résultats sur des instances réelles du CHT. . . . .	180
6.14	Résultats sur des instances générées aléatoirement de grandes tailles. . . . .	180
6.15	Résultats sur des instances générées aléatoirement de type CHT. . . . .	181
6.16	Formules mathématiques des métriques de similarité. . . . .	182
6.17	Évaluation des métriques de similarité sur des instances réelles de tailles différentes. . . . .	185
6.18	Coefficients de corrélation entre les distances de similarité présentées dans la Table 6.17. . . . .	185
A. 19	Prestation alimentaire proposée pour le restaurant du Self. . . . .	203
A. 20	Planning d'expédition des repas de midi et de soir par destinataire. . . . .	206
A. 21	Collecte des données sur terrain pour la construction des instances réelles. . . . .	209
A. 22	Collecte des données sur terrain pour la construction des instances réelles. . . . .	210
A. 23	Collecte des données sur terrain pour la construction des instances réelles. . . . .	211
A. 24	Instance réelle de production avec 82 plats, 370 opérations et 29 machines. . . . .	218
A. 25	Planning de production de l'instance présentée dans la Figure A. 24 obtenu avec l'algorithme génétique. . . . .	220

# Liste des figures

1.1	Entrée du nouveau bâtiment d'accueil du CHT. . . . .	9
1.2	Véhicule à guidage automatique AGV. . . . .	10
1.3	Exemple de chariot de repas. . . . .	10
1.4	Hôpitaux Champagne Sud. . . . .	12
1.5	Répartition du budget des HCS. . . . .	13
1.6	Répartition des investissements des HCS. . . . .	13
1.7	Plate-forme logistique du CH de Troyes. . . . .	14
1.8	Historique de la demande des repas par an. . . . .	18
1.9	Unité centrale de production alimentaire du CHT. . . . .	20
1.10	Zone de production froide +12°C. . . . .	24
1.11	Zone de production chaude. . . . .	25
1.12	Zone de refroidissement des produits après cuisson. . . . .	25
1.13	Zone de stockage et d'expédition des PCEA +3°C. . . . .	25
1.14	Zone de laverie des plateaux de repas, caquettes et chariots. . . . .	26
1.15	Zone de montage et assemblage des plateaux-repas +12°C. . . . .	26
1.16	Système de restauration, source : Poulain and Larrose [1]. . . . .	27
1.17	Sites de distribution des repas de déjeuner et dîner. . . . .	27
1.18	Répartition des ENTREES selon les gammes. . . . .	31
1.19	Répartition des VIANDES selon les gammes. . . . .	31
1.20	Répartition des GARNITURES selon les gammes. . . . .	31
1.21	Répartition des DESSERTS selon les gammes. . . . .	31
1.22	Schéma général d'organisation d'une cuisine d'assemblage, source : Poulain and Larrose [1]. . . . .	32
1.23	Étapes du fonctionnement de la liaison froide. . . . .	33
1.24	Interactions entre les différents logiciels de l'UCPA. . . . .	35
1.25	Vision globale du système organisationnel de la production des repas. . . . .	36
1.26	Les déclinaisons des régimes alimentaires en pourcentage. . . . .	37
2.1	Perspective du WG7 pour la modélisation des systèmes de production et logistiques du futur (adapté de Panetto et al. [2]). . . . .	50
2.2	Études réalisées sur les facteurs humains dans les systèmes de production et logistiques. . . . .	51
2.3	Thèmes des travaux de recherche plus récentes. . . . .	51
2.4	Aspects des facteurs humains considérés dans les travaux de la littérature. . . . .	52
2.5	Objectifs des travaux de la littérature. . . . .	52
2.6	Répartition des travaux de recherche par année de publication. . . . .	53
2.7	Co-occurrence des mots-clés utilisés dans les recherches en fonction de l'année de publication. . . . .	54
2.8	Réseau des mots-clés de co-occurrence dans des études précédentes. . . . .	54
2.9	Synthèse bibliographique sur les méthodes de résolution utilisées pour le FJSP et les fonctions objectives étudiées dans la littérature. (Chaudhry and Khan [3]). . . . .	68
2.10	Schémas de codage d'un chromosome. . . . .	77
2.11	Architecture du schéma de codage OSS. . . . .	78
2.12	Codage d'une solution par des chaînes d'affectation et de séquençement. . . . .	79
2.13	Ordre de séquençement réalisable. . . . .	79
2.14	Ordre de séquençement non réalisable. . . . .	79
2.15	Codage de solution basé sur le schéma NSS-Groupe 1. . . . .	80
2.16	Codage de solution basé sur le schéma NSS-Groupe 2. . . . .	81
2.17	Codage et décodage de solution pour le FJSP à contrainte de ressource unique. . . . .	83

3.1	Stratégie de fractionnement des tâches (plats) en lots. . . . .	86
3.2	Schéma représentatif du processus de fabrication des repas. . . . .	87
3.3	Gammes opératoires pour la préparation des plats. . . . .	88
3.4	Ensemble de ressources disponibles pour la réalisation des opérations des gammes opératoires. . . . .	89
3.5	Ordre de traitement des tâches sur les ressources. . . . .	90
3.6	Ressources alternatives pour la réalisation des opérations des tâches. . . . .	90
3.7	Exemple basique du problème étudié. . . . .	91
3.8	Temps de setup des ressources dépendant de la séquence des opérations. . . . .	94
3.9	Traitement de plusieurs lots en même temps par la même ressource. . . . .	95
3.10	Précédence entre les opérations des lots des tâches. . . . .	96
3.11	Fenêtres horaires de disponibilité des ressources. . . . .	96
4.1	Codage basique d'une solution d'un algorithme génétique. . . . .	102
4.2	Organigramme basique du fonctionnement d'un algorithme génétique. . . . .	102
4.3	Codage et décodage de solution pour le FJSP-SDST-JS-MTMR. . . . .	104
4.4	Les différents cas possibles pour le décodage d'un chromosome. . . . .	111
4.5	Déroulement d'un opérateur de croisement d'affectation OMAC. . . . .	114
4.6	Déroulement d'un opérateur de croisement de séquençement JLOSC 2. . . . .	116
4.7	Déroulement d'un opérateur de croisement de séquençement SLOSC 2. . . . .	117
4.8	Déroulement de l'opérateur de mutation ROAM. . . . .	118
4.9	Déroulement de l'opérateur de mutation OSSM. . . . .	119
4.10	Déroulement de la recherche locale par mouvement des gènes. . . . .	120
4.11	Déroulement de la recherche locale par regroupement des lots. . . . .	120
4.12	Organigramme fonctionnel des algorithmes génétiques développés. . . . .	123
4.13	Déroulement de l'opérateur d'affectation AO. . . . .	127
4.14	Déroulement de l'opérateur de séquençement SO : cas où les contraintes de précédence ne sont pas violées. . . . .	129
4.15	Déroulement de l'opérateur de séquençement SO : cas où les contraintes de précédence sont violées. . . . .	129
4.16	Procédure de perturbation d'une solution. . . . .	130
4.17	Déroulement de l'algorithme ILS sur une itération. . . . .	132
4.18	Organigramme fonctionnel des algorithmes de recherche locale itérative développés. . . . .	134
5.1	Temps d'exécution du GA 1 avec les différentes combinaisons des heuristiques d'affectation et de séquençement. . . . .	139
5.2	Évolution de la fonction fitness $\sum_i C_i$ dans GA 1 avec les différentes combinaisons des heuristiques d'affectation et de séquençement. . . . .	139
5.3	Temps d'exécution du GA 2 avec les différentes combinaisons des heuristiques d'affectation et de séquençement. . . . .	140
5.4	Évolution de la fonction fitness $\sum_i C_i$ dans GA 2 avec les différentes combinaisons des heuristiques d'affectation et de séquençement. . . . .	140
5.5	Temps d'exécution de ILS 1 avec les différentes combinaisons des heuristiques d'affectation et de séquençement. . . . .	141
5.6	Évolution de la fonction objective $\sum_i C_i$ dans ILS 1 avec les différentes combinaisons des heuristiques d'affectation et de séquençement. . . . .	141
5.7	Temps d'exécution de ILS 2 avec les différentes combinaisons des heuristiques d'affectation et de séquençement. . . . .	142
5.8	Évolution de la fonction objective $\sum_i C_i$ dans ILS 2 avec les différentes combinaisons des heuristiques d'affectation et de séquençement. . . . .	142
5.9	Opérateur de croisement OMAC 1. . . . .	143
5.10	Opérateur de croisement OMAC 2. . . . .	144
5.11	Opérateur de croisement OMAC 3. . . . .	144
5.12	Opérateur de croisement JLOSC 1. . . . .	144
5.13	Opérateur de croisement JLOSC 2. . . . .	144
5.14	Opérateur de croisement SLOSC 1. . . . .	144
5.15	Opérateur de croisement SLOSC 2. . . . .	144
5.16	Recherche locale avec OMAC 1, JLOSC 1 et SLOSC 1. . . . .	145
5.17	Recherche locale avec OMAC 2, OMAC 3, JLOSC 2 et SLOSC 2. . . . .	145
5.18	Opérateur d'affectation AO 1. . . . .	145
5.19	Opérateur d'affectation SO 1. . . . .	145

5.20	Opérateur d'affectation AO 2.	145
5.21	Opérateur de séquence SO 2.	145
5.22	Opérateur de séquence AO 3.	146
5.23	Opérateur de séquence SO 3.	146
5.24	Graphique des effets principaux de $\sum_i C_i$ dans GA 1.	149
5.25	Graphique des effets principaux de S/N dans GA 1.	149
5.26	Graphique des effets principaux de $\sum_i C_i$ dans GA 2.	150
5.27	Graphique des effets principaux de S/N dans GA 2.	150
5.28	Graphique des effets principaux de $\sum_i C_i$ dans ILS 1.	151
5.29	Graphique des effets principaux de S/N dans ILS 1.	151
5.30	Graphique des effets principaux de $\sum_i C_i$ dans ILS 2.	152
5.31	Graphique des effets principaux de S/N dans ILS 2.	152
5.32	Diagrammes de Gantt de la solution résultante du premier exemple.	153
5.33	Diagrammes de Gantt de la solution résultante du deuxième exemple.	154
5.34	Diagrammes de Gantt des solutions résultantes des deux cas considérés de la première instance.	155
5.35	Diagrammes de Gantt des solutions résultantes des deux cas considérés de la deuxième instance.	156
5.36	Évolution de la fonction objective et le pourcentage de réduction de $\sum_i C_i$ en fonction du nombre de lots.	157
5.37	Solution Cplex de l'instance avec 6 tâches et 4 machines.	158
5.38	Graphe de convergence du GA de l'instance avec 6 tâches et 4 machines.	158
5.39	Digrammes de Gantt des solutions résultantes avec Cplex et GA.	159
5.40	Comportement de convergence de Cplex et de l'AG sur l'instance avec 10 tâches, 48 opérations et 29 machines.	160
5.41	Comportement de convergence de Cplex et de l'AG sur l'instance avec 20 tâches, 93 opérations et 29 machines.	160
5.42	Diagrammes de Gantt de la solution résultante de l'instance avec 10 tâches, 48 opérations et 29 machines.	161
5.43	Diagrammes de Gantt de la solution résultante de l'instance avec 20 tâches, 93 opérations et 29 machines.	162
6.1	Planning partiel d'une organisation réelle d'une journée de production.	172
6.2	Pourcentages d'amélioration des solutions réelles.	178
6.3	Temps de travail et de pauses journaliers des agents.	179
6.4	Calcul de la distance $d_1$ .	184
6.5	Calcul de la distance $d_2$ .	184
6.6	Calcul de la distance $d_3$ .	184
6.7	Calcul de la distance $d_4$ .	184
6.8	Calcul de la distance $d_5$ .	184
A. 9	Synthèse des résultats des sondages du bien-être au travail.	193
A. 10	Plan de l'unité centrale de production alimentaire.	194
A. 11	Plan de l'unité centrale de production alimentaire avec les différentes zones de production.	195
A. 12	Organigrammes fonctionnels de l'UCPA.	196
A. 13	Organisation du service de restauration.	197
A. 14	Synoptique de fonctionnement de l'UCPA.	199
A. 15	Flux de prise de décision pour la fabrication des repas.	200
A. 16	Exemple de plan alimentaire saison hiver semaine 1.	200
A. 17	Exemple de plan de menu saison hiver semaine 1 (menu normal).	201
A. 18	Exemple de plan de menu saison hiver semaine 1-4 (menu normal).	201
A. 19	Exemple d'une semaine de menus avec profil alimentaire.	202
A. 20	Exemple de fiche technique (fiche suiveuse).	202
A. 21	Exemple de planning d'une journée de production pour la fabrication des repas de midi.	204
A. 22	Exemple de planning d'une journée de production pour la fabrication des repas de soir.	205
A. 23	Planning de conditionnement des repas.	206
A. 24	Plateau de repas individuel.	207
A. 25	Ressources de cuisson disponibles en zone de production chaude.	207
A. 26	Déboitage des fruits au sirop.	208
A. 27	Conditionnement de repas en production chaude.	208
A. 28	Mise en cagettes des repas sur des socles rouleurs.	208
A. 29	Allotissement des plateaux de repas.	208
A. 30	Planning d'une organisation réelle d'une journée de production.	212



A. 31	Planning d'une organisation réelle d'une journée de production. . . . .	212
A. 32	Planning d'une organisation réelle d'une journée de production. . . . .	213
A. 33	Taux d'occupation des ressources sur une journée réelle de production. . . . .	213
A. 34	Taux d'occupation des ressources sur une journée réelle de production. . . . .	214
A. 35	Taux d'occupation des ressources sur une journée réelle de production. . . . .	214
A. 36	Remplissage des données traitées dans un fichier d'entrée TXT. . . . .	216
A. 37	Exportation des résultats d'une instance avec 15 tâches, 76 opérations et 29 machines dans un fichier de sortie TXT. . . . .	217

# Introduction générale

Le secteur de la santé en France connaît une transformation radicale ces dernières années visant à réduire les coûts tout en améliorant la qualité de service aux patients. La logistique joue un rôle stratégique important dans cette transformation et dans la création d'un nouveau système de santé performant (Landry and Beaulieu [4], Benzidia et al. [5], Bentahar and Benzidia [6]). Cependant, un retard important de la logistique hospitalière, a été constaté par rapport à la logistique des autres secteurs industriels. En effet, en 1999, Rickles [7] soulignait que la logistique de la santé avait 20 ans de retard par rapport à celle des secteurs agro-alimentaire et de commerce. Deux décennies plus tard, plusieurs enquêtes montrent encore des coûts logistiques plus élevés dans le secteur de la santé comparativement à d'autres industries (Beaulieu and Roy [8]). La variété des flux (restauration, médicaments, linge, déchets, ...), la complexité des processus et les contradictions entre les logiques administrative et professionnelle des soins peuvent expliquer en partie ce manque de performance de la logistique hospitalière (Husson [9], Bentahar and Benzidia [6]).

La crise sanitaire déclenchée par l'épidémie de Covid-19 a jeté une lumière crue sur le manque de moyens hospitaliers. Cette dernière a montré la vulnérabilité de la logistique de la santé et sa dépendance à une chaîne globalisée centrée sur le tout économique au détriment des critères de robustesse, d'agilité et de durabilité. L'échec des stratégies d'approvisionnement et de distribution des masques et des vaccins en France est un exemple du manque de considération, de compétences et de moyens technologiques pour la logistique hospitalière. Cette fragilité de la logistique de la santé est une problématique majeure à laquelle les pouvoirs publics et les chercheurs devraient apporter des réponses structurées sous l'effet de l'urgence. Le retard de la logistique hospitalière peut être comblé en partie, par l'implémentation des technologies innovantes de la digitalisation. En effet, Benzidia et al. [10], Beaulieu and Bentahar [11] ont observé dans le cadre de leurs recherches l'impact positif de la digitalisation de la logistique sur l'efficacité, la réactivité et la durabilité des organisations de la santé. La digitalisation de la logistique de la santé peut bénéficier du développement des technologies traditionnelles et également des technologies innovantes tel que : le big data, l'intelligence artificielle, l'internet des objets et la blockchain. L'automatisation de la logistique des flux des hôpitaux en France via l'implémentation des AGVs montrent une réduction importante des coûts de travail et une amélioration des conditions de travail des agents hospitaliers, en équilibrant leur charge de travail et en leur déchargeant des tâches logistiques (Benzidia et al. [5]).

Ces dernières années, en raison du manque d'efficacité et de performance dans la gestion de la logistique hospitalière, la qualité de vie au travail et le bien-être des agents hospitaliers se sont fortement détériorés. Une hausse de l'absentéisme, des arrêts de maladies et de travail, ainsi que des burnouts et du turnover ont été notamment constatés. En plus, les difficultés rencontrées liées à la gestion des flux et des stocks, conduisent les responsables et les gestionnaires à trouver des équilibres et de nouvelles pistes d'amélioration pour rationaliser les dépenses en recherchant des solutions affinées à ces différentes problématiques. Dans ce contexte, les établissements de soins découvrent l'importance de l'optimisation des processus logistiques comme une nouvelle approche pour une gestion efficace de toutes les activités. Ceci permet aux établissements de santé d'améliorer la gestion des stocks, de limiter le gaspillage et d'assurer un meilleur suivi des stocks et de traçabilité des produits. La logistique hospitalière fait partie de la performance globale où les activités sont organisées et structurées dans le but de satisfaire les patients en termes de qualité, quantité, délai, sécurité et au moindre coût. La chaîne logistique représente une source importante des coûts, sa ré-organisation permet de réaliser des économies cruciales sur l'ensemble des dépenses hospitalières. D'autre part, l'augmentation de la dépense hospitalière peut causer des déficits inquiétants. Les dépenses sur les produits alimentaires représentent une partie importante des dépenses totales sur laquelle il semble possible d'agir rapidement. L'obligation de maîtrise des dépenses de santé est donc en elle-même une raison supplémentaire et suffisante pour entreprendre des démarches de réorganisation de la chaîne logistique. Ces problématiques confirment la nécessité de restructurer les flux des produits alimentaires qui méritent d'être analysés et évalués. Cremadez and Grateau [12] s'opposent à cette idée en soulignant que la finalité du système hospitalier est d'assurer le bien-être du patient quel qu'en soit le coût.

Dans ce contexte, la recherche constante d'économies pour les responsables de santé, est une approche naturelle pour examiner la façon dont les activités du service de restauration sont gérées et organisées en vue d'accroître sa productivité et sa performance. Ces problématiques nécessitent de fortes mutations des pratiques hospitalières de management en recherchant la rentabilité, la diminution des coûts, l'efficacité et la qualité de service. Ceci oblige la direction d'un établissement à veiller sur la bonne utilisation des ressources dont elle dispose pour faire face à la demande. Ceci explique la tendance actuelle des hôpitaux pour la maîtrise de l'ensemble des processus de la chaîne logistique depuis les lieux de production jusqu'aux lieux de consommations.

Les établissements de santé sont tenus d'une part d'assurer une qualité de service irréprochable vis-à-vis des patients, et d'autre part d'optimiser les activités de leurs chaînes logistiques. Ces contraintes ont conduit le système hospitalier français à s'engager dans une démarche de réorganisation profonde et de maîtrise de la croissance des dépenses de santé et des budgets. Ces contraintes stimulent des réflexions sur la manière d'utiliser plus efficacement les moyens disponibles (Landry et al. [13], Blouin et al. [14], Sampieri-Teissier [15]). Les profondes évolutions et transformations d'environnement et la régression économique conduisent l'hôpital à reformuler sa politique de santé qui passe par des impératifs de maîtrise des dépenses dans ce secteur (Mucchielli [16] et Cauvin [17]). Cette

---

transformation suppose une réorganisation de la chaîne logistique pour s'adapter aux besoins des patients. Naylor [18] résume cette situation par l'exigence de l'optimisation de la triade antithétique des objectifs des systèmes de santé : qualité, accessibilité et coût.

Généralement, l'offre des soins s'appuie sur divers produits et services qui sont déployés dans un établissement de santé par un ensemble d'activités que Beaulieu and Landry [19] intègrent sous le vocable de logistique hospitalière. Ces activités logistiques peuvent apporter une contribution significative à la performance des hôpitaux notamment par la présence des bons produits au moment opportun pour soutenir la prestation des services. La logistique hospitalière représente un processus complexe qui se caractérise par une diversité des besoins, des utilisateurs, des produits ainsi que des canaux de distribution. Cette logistique a principalement pour mission de maîtriser et d'optimiser les flux physiques depuis les fournisseurs jusqu'aux patients. C'est un outil indispensable pour la réorganisation des processus de la chaîne. Par cette réorganisation on recherche la meilleure performance au meilleur coût, tout en respectant les conditions techniques, économiques et réglementaires pour une dispensation optimale aux patients. Selon Fixari and Tonneau [20] la gestion des activités logistiques à l'hôpital présente des caractéristiques très particulières, qui influencent directement la définition du rôle et de la place du patient vis-à-vis des soins. On pourrait même aller plus loin en considérant que les flux à l'hôpital sont beaucoup plus critiques et sensibles que ceux des autres secteurs industriels. D'autre part, la coordination de ces activités demande une expertise logistique que peu d'établissements réussissent à développer par eux-mêmes (Ruiz Bartolomé [21]). Ce constat a conduit les chercheurs à s'intéresser depuis quelques années à la gestion et l'optimisation de la chaîne logistique dans les hôpitaux. L'évolution du secteur hospitalier ainsi que la richesse et l'originalité du milieu hospitalier ont contribué à son essor. Le flux des produits alimentaires est l'une des cibles privilégiées de cette gestion. Bonniol et al. [22] indiquent que le flux physique a toujours joué un rôle important pour le maintien et la prestation des soins de santé (sauver des vies, empêcher la propagation des maladies, aider à poser des diagnostics, améliorer la qualité de la vie au travail et soulager la douleur).

Selon Gasquet [23] les fonctions logistiques des hôpitaux évoluent tout autant que les activités médicales et médico-techniques mais sans doute de manière moins visible. Ces fonctions logistiques peuvent non seulement être la source d'économies au niveau des activités logistiques mêmes mais également dégager des ressources pour les soins aux malades par un meilleur soutien à la prestation de service. Quel que soit son champ d'intervention, la logistique n'est pas une science aux lois immuables mais une approche qui adapte ses apports du niveau stratégique à l'opérationnel en fonction de son environnement et des objectifs définis. Comme pour d'autres secteurs d'activité, l'enjeu à venir consiste pour l'ingénieur logisticien, à apporter sa contribution à l'ensemble des processus de l'hôpital. La logistique est toujours au service des missions et des objectifs d'une entreprise ou du projet d'établissement d'un hôpital. De ce fait, elle accompagne naturellement les évolutions d'un système.

L'intérêt d'une recherche portant sur la logistique hospitalière est qu'on la considère comme une clé de l'évolution et de l'optimisation de la gestion des flux d'un établissement de santé notamment vis-à-vis de son apport sur le cœur de métier des hôpitaux. Dans une période de contraintes financières, les responsables logistiques jouent un rôle important dans le centre hospitalier car ils doivent développer des stratégies de réduction des coûts. L'étude de Thévenin [24] menée auprès d'établissements de santé français, souligne que des transformations majeures des activités logistiques nécessitent un accord favorable des responsables des fonctions médicales de l'établissement, le poids du département logistique étant à lui seul insuffisant. De plus, l'auteur constate que ces transformations ne s'inscrivent pas dans une démarche ponctuelle mais plutôt dans un processus plus global associé au développement du projet d'établissement. Dans ce contexte, la performance globale de la chaîne logistique peut être améliorée à la fois par un renforcement de chaque maillon et par un renforcement des liaisons entre les maillons (Detrie [25]).

Afin de répondre efficacement aux besoins des patients et d'améliorer les conditions de travail et le bien-être des employés, le centre hospitalier de Troyes met en œuvre des moyens importants pour améliorer son efficacité au quotidien. C'est dans ce cadre que se situe notre étude d'optimisation et de réorganisation des activités du service de restauration du CHT. Le CHT conduit un projet de révision de sa chaîne logistique, qui doit notamment considérer la gestion des flux alimentaires. Ce travail se situe au cœur de la problématique actuelle de l'optimisation de la chaîne logistique hospitalière. En effet, le centre hospitalier de Troyes, en tant que composante principale des Hôpitaux Champagne Sud, fournit des repas aux centres hospitaliers, aux maisons de retraite et aux cliniques psychiatriques. Notre étude menée dans l'unité centrale de production alimentaire vise à déterminer le meilleur plan pour répondre aux demandes des clients en termes de repas et à proposer des moyens et des pistes pour améliorer le bien-être et les conditions de travail des employés du service de restauration. Compte tenu de la complexité et de l'ampleur des flux concernés, le projet de réorganisation de la gestion des produits alimentaires fait le seul objet de cette étude. Concernant les flux physiques, nous analysons donc uniquement la gestion de la chaîne logistique des repas, et nous nous focalisons principalement sur l'organisation quotidienne du travail. L'objectif est de fournir des méthodes et des outils permettant de planifier et d'ordonnancer les processus de production alimentaire sur la journée.

La suite de ce manuscrit est organisée comme suit : le chapitre 1 porte sur une présentation du Centre Hospitalier de Troyes, les Hôpitaux Champagne Sud et sur l'exposition des problématiques de recherche traitées dans cette thèse. Nous introduisons à cet effet, le contexte général et les objectifs visés dans cette étude, ainsi que les problématiques observées dans le cadre de la démarche d'optimisation de la logistique des produits alimentaires et d'amélioration des conditions de travail et le bien-être des employés. Par la suite, nous présentons la démarche et la méthodologie de recherche adoptées pour répondre à ces problématiques. Ensuite, nous exposons nos travaux issus d'une étude de terrain pour observer, identifier et analyser les flux logistiques alimentaires, présentant à cet égard le service de restauration et le système organisationnel de production alimentaire, afin de

---

bien comprendre et connaître le système étudié, ses contraintes et ses particularités. Un état de l'art sur les différents problèmes abordés dans cette thèse est présenté dans le chapitre 2. Dans le chapitre 3, une description détaillée du problème d'ordonnancement des processus de production alimentaire, ainsi que le modèle mathématique développé pour résoudre ce problème, sont présentés. Le chapitre 4 est consacré au fonctionnement et la description de l'architecture des métaheuristiques développées pour le problème étudié. Dans le chapitre 5 nous nous focalisons sur la présentation et discussion des résultats expérimentaux d'implémentation de ces métaheuristiques sur des instances réelles et théoriques. Dans le chapitre 6, nous présentons la méthodologie de recueil des données et les résultats d'application des méthodes développées sur le terrain. Enfin, nous concluons cette thèse en présentant un bilan final de notre étude, en reprenant les grandes lignes des travaux effectués et en ouvrant quelques perspectives de recherche. À la fin du manuscrit, nous proposons des annexes présentant des figures et des tableaux supplémentaires, sur lesquelles le lecteur pourra se reporter.



# Chapitre 1

## Contexte général de l'étude

### 1.1 Introduction

L'année 2014 a connu une forte mobilisation et implication de la DGOS (Direction Générale de l'Offre des Soins) sur les enjeux que connaît actuellement l'offre de soins en France. Le projet de loi porté en 2014 sur la modernisation, la simplification et l'innovation pour un égal accès à des soins continus et de qualité, a facilité la mise en place des groupements hospitaliers de territoire, la santé numérique, et la professionnalisation de la fonction des achats. D'après la DGOS, les résultats financiers des hôpitaux publics en France en 2016 ont été à l'équilibre ou en excédent pour 54 %, et en déficit pour 46 %. Cependant, en réalité seulement 14 % des établissements concentrent 80 % du déficit.

La Fédération hospitalière de France (FHF) dans son [rapport annuel 2017](#), a noté que la situation financière globale des hôpitaux publics en France s'est aggravée avec un déficit qui a doublé, avoisinant le milliard d'euros. En effet, en 2016 ce déficit atteint 470 millions d'euros. Les solutions proposées par FHF pour faire des économies reposent sur quatre axes : la confiance envers les professionnels, l'équité entre les acteurs de santé, l'innovation et l'investissement.

Les travaux réalisés par Henning [26], Kowalski [27] et Bourgeon et al. [28], qui portent sur l'évaluation de l'activité logistique dans le milieu hospitalier en France, estiment que la part de cette dernière est entre 31 % et 34 %. Chow et al. [29] estiment que la part de l'activité logistique dans le budget d'exploitation d'un hôpital, est de 46 %. Selon Bourgeon et al. [28], les dépenses d'un établissement de santé dues à la logistique hospitalière en France et en Pays-Bas représentent entre 31 % et 34 % du budget annuel. Davis [30] estime que cette part est de 25 %, et conclut qu'il est possible de réduire de 15 % les coûts et les dépenses liés à la logistique, ce qui démontre l'importance en terme d'économie, d'une réorganisation de l'activité logistique des hôpitaux.

C'est dans ce contexte que le Centre Hospitalier de Troyes, a établi une collaboration avec le Laboratoire d'Informatique et Société Numérique (LIST3N) de l'Université de Technologie de Troyes (UTT), menée dans le cadre de thèses CIFRE, pour l'optimisation de sa chaîne logistique. La présente thèse se focalise particulièrement sur l'optimisation de la logistique des flux alimentaires.



Dans ce chapitre, nous commençons par une brève présentation du Centre Hospitalier de Troyes et des Hôpitaux Champagne Sud. Par la suite, nous présentons le contexte et les problématiques étudiées dans le cadre de cette thèse, ainsi que la méthodologie de recherche élaborée pour répondre à ces différentes problématiques. Les sections suivantes de ce chapitre seront consacrées à la présentation du service de restauration, l'unité centrale de production alimentaire et le système organisationnel de production des repas.

## 1.2 Présentation du centre hospitalier de Troyes

Le Centre Hospitalier de Troyes est le plus important hôpital de l'Aube et le deuxième de l'ex-région Champagne-Ardenne après le CHU de Reims en termes de taille et de niveau de technicité. Il est composé de trois sites : l'hôpital Simone Veil, la résidence Comte Henri et le Domaine de Nazareth (Ehpad). Il dispose d'un institut de formation, d'un centre d'enseignement des soins d'urgence et accueille environ 120 internes chaque année. Ses activités sont réparties sur les sites suivants :

- l'hôpital Simone Veil : ce dernier est le site principal, il offre des soins tels que : consultations externes de la médecine et de la chirurgie, court séjour (569 lits et places, dont 403 de médecine, 115 de chirurgie et 51 d'obstétrique), traitement et cure ambulatoire (radiothérapie, chimiothérapie, dialyse), urgences, maternité, imagerie et des soins de longue durée (70 lits),
- la résidence Comte-Henri : elle offre des soins de suite et de réadaptation (95 lits), des soins de longue durée et des soins palliatifs,
- le domaine de Nazareth (Pont-Sainte-Marie) : il offre des activités d'addictologie et possède 275 lits d'Ehpad,
- la plateforme logistique : elle s'occupe des activités logistiques et réunit la cuisine centrale, la blanchisserie et le magasin central.

Le centre hospitalier de Troyes est le plus grand employeur du département de l'Aube avec un effectif d'environ 2 444 employés durant l'année 2015. Ce chiffre a évolué depuis quelques années pour accompagner les visions et les objectifs de la direction du CHT qui visent à améliorer la qualité des services. Le personnel du CHT est constitué d'un effectif médical (praticiens hospitaliers, assistants, internes, cliniciens hospitaliers, étudiants, ...) et non médical (personnel administratif, soignant, éducatif, technique ...).

Le CHT dispose de 1 086 lits et places, et comprend 8 pôles : oncologie, clinique médicale, vasculaire, chirurgie, mère-enfant, pôle urgences, pôle médico-techniques, pôle évaluation, sécurité et qualité des soins. Il abrite le SAMU<sup>1</sup> 10 et son service d'urgences reçoit plus de 50 000 patients par an. Il réalise plus de 322 000 journées d'hospitalisation, plus de 250 000 consultations externes en secteur public, plus de 60 000 passages aux urgences, et 2 172 naissances.

---

1. Service d'Aide Médicale Urgente.

Le CH de Troyes propose la majorité des disciplines médicales, chirurgicales et médico-techniques. Il possède notamment une maternité de niveau 3 (niveau maximal signifiant qu'elle dispose d'une unité d'obstétrique, d'une unité de néonatalogie et d'une unité de réanimation néonatale), un service d'urgences/SMUR<sup>2</sup> et un plateau technique performant : un TepScan<sup>3</sup>, deux IRM, deux scanners, deux mammographes, deux accélérateurs de particules (radiothérapie), dix salles de bloc opératoire, un robot chirurgical, etc. Des unités innovantes complètent son offre de soins telles qu'une unité neurovasculaire aiguë permettant la prise en charge des accidents vasculaires cérébraux (AVC), une unité cognitivo-comportementale (UCC) pour les patients atteints de la maladie d'Alzheimer, une unité de génétique et des unités de soins critiques : réanimation, soins continus, soins intensifs de cardiologie. Il est doté d'un nouveau bâtiment d'hospitalisation adulte de médecine et de chirurgie de 430 lits, dont 75 % de chambres à 1 lit et 27 % de chambre à 2 lits.

En 2004, le CHT est passé à une modernisation des conditions d'hébergement à travers la construction d'un nouveau bâtiment d'hospitalisation. En effet, une plate-forme logistique (cuisine, blanchisserie, magasin) a été construite à Saint-Julien-les-Villas et inaugurée en novembre 2009. Elle a permis d'envisager la construction d'un bâtiment de 430 lits, dont le financement est assuré par le plan "Hôpital 2012". Son ouverture a permis de rapprocher les services de moyens séjours et d'améliorer les conditions d'hébergement des unités pour les personnes âgées restant à la résidence.

L'année 2015 a connu l'inauguration du nouveau Bâtiment d'hospitalisation (Figure 1.1). C'est une étape décisive de la rénovation du Centre Hospitalier de Troyes qui a commencé à offrir des conditions de confort optimales à toute hospitalisation adulte de médecine et de chirurgie. Ainsi, en libérant de nombreuses surfaces dans les anciens bâtiments, le Centre Hospitalier dispose de plus d'espaces permettant la poursuite du développement et la rénovation des derniers services vétustes. Cette année a été aussi marquée par une profonde restructuration du service des urgences, la fusion des équipes SAMU-SMUR-Urgences, nouvelles organisations, déménagement de l'Unité d'Hospitalisation Courte Durée (UHCD) : les personnels concernés ont connu de profonds bouleversements, qui se poursuivent en 2016.



FIGURE 1.1 – Entrée du nouveau bâtiment d'accueil du CHT.

- 
2. Service Mobile d'Urgence et de Réanimation.
  3. Tomographie par Emission de Positons Couplé à un Scanner.

Ce projet a permis également de répondre à l'objectif d'améliorer l'ergonomie et les conditions de travail. De ce fait, à partir de 2015, le CHT a fait le choix des transports automatisés lourds et il est désormais équipé d'un système logistique de 11 robots manutentionnaires (Figure 1.2) permettant de mieux optimiser les flux logistiques. Leur principal avantage réside dans la capacité de transporter tout type de chariots.



FIGURE 1.2 – Véhicule à guidage automatique AGV.

Ce nouveau système mis en place permet d'assurer un transport automatique par chariots (Figure 1.3) des denrées alimentaires et différents types de produits (plateaux de repas, armoires de linge, armoires de produits pharmaceutiques, ...), à partir de la plateforme logistique vers les clients servis.

Il permet également de :

- maintenir une bonne fiabilité dans la livraison ponctuelle des marchandises,
- maintenir un niveau élevé de sécurité des biens et des personnes,
- réduire les coûts logistiques internes,
- gérer et suivre automatiquement le matériel.

La mise en place de cette nouvelle technologie a permis de libérer des tâches de manutentions de 18 agents hospitaliers, notamment des aides soignants.



FIGURE 1.3 – Exemple de chariot de repas.

Le CHT s'efforce de fournir de meilleurs soins et services à travers plusieurs engagements :

- l'engagement d'un accueil de qualité, grâce à une équipe mobilisée pour offrir à chacun un accueil individualisé, qui préserve au mieux son confort, sa liberté et son autonomie ;
- l'engagement d'une prise en charge optimale, grâce à un personnel parfaitement qualifié, une offre de soin complète et un équipement de pointe ;
- l'engagement d'un confort accru pour toute l'hospitalisation adulte de médecine et de chirurgie grâce à un nouveau bâtiment d'hospitalisation (ouvert en octobre 2014) doté de 430 chambres (80 % de chambres à 1 lit, 20 de chambres à 2 lits) inspirées du confort hôtelier ;
- l'engagement d'une attention particulière envers les familles et visiteurs grâce à des espaces de détente, d'échanges et des temps de visite bien aménagés ;
- l'engagement du respect de la vie privée à toute personne ainsi que la confidentialité des informations personnelles, administratives, médicales et sociales qui la concernent ;
- l'engagement de respecter la charte de la personne hospitalisée du Ministère de la Santé.

En concert avec le plan hôpital 2002 (et 2012), le Centre Hospitalier de Troyes mène plusieurs projets visant à améliorer l'efficacité de ses diverses activités tels que :

- la construction d'une plate-forme logistique (cuisine, blanchisserie, magasin) ;
- la construction d'un bâtiment pour l'IRM et le scanner ;
- la mise en service d'un nouveau plateau technique à la disposition de la pharmacie, des blocs opératoires et de la chirurgie ambulatoire ;
- la restructuration du service des urgences ;
- l'aménagement du service de la médecine nucléaire ;
- les travaux d'extensions du service de la radiothérapie ;
- la construction d'un bâtiment de 80 lits de maison de retraite à Nazareth.

En 2016, le CHT a été regroupé avec d'autres centres hospitaliers afin de former le regroupement Hôpitaux Champagne Sud (HCS). Ce regroupement fait partie des actions que le CHT mène dans le but d'améliorer l'offre et le parcours de soin des patients sur son territoire, d'offrir de plus grandes perspectives de carrière aux professionnels et d'augmenter son attractivité et sa force.

## Les Hôpitaux Champagne Sud

Constitués en 2015, les Hôpitaux Champagne Sud (HCS) sont un regroupement en direction commune de sept établissements de santé (Figure 1.4) du département de l'Aube et du Sézannais qui sont :

- le Centre Hospitalier de Troyes,
- le GHAM (Groupement Hospitalier Aube-Marne composé des établissements de Romilly-sur-Seine, Nogent-sur-Seine et Sézanne),

- l'EPSMA (Établissement Public de Santé Mentale de l'Aube) de Brienne-le-Château,
- le Centre Hospitalier de Bar-sur-Aube,
- le Centre Hospitalier de Bar-sur-Seine,
- la Résidence Cardinal de Loménie (Brienne-le-Château),
- le Groupement de Coopération Sanitaire Clinique de Champagne.

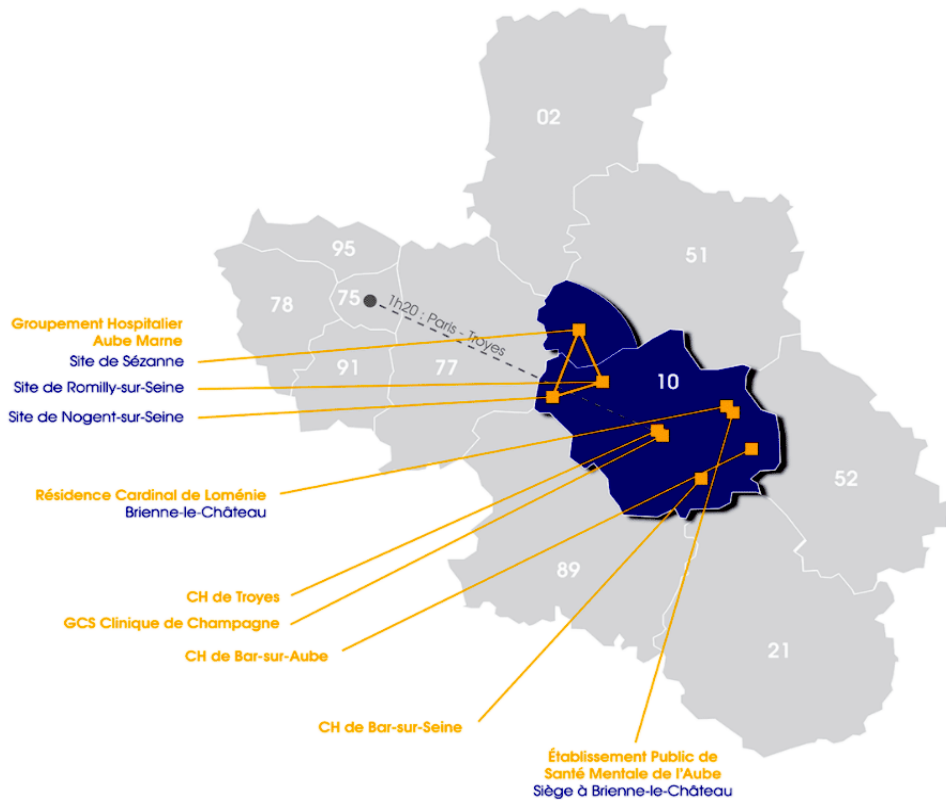


FIGURE 1.4 – Hôpitaux Champagne Sud.

Les HCS garantissent l'accès aux soins de 350 000 habitants sur un territoire de plus de 7 000 km<sup>2</sup>. Ils assurent ensemble la majorité des soins auxquels un patient peut avoir besoin de recourir. Ceci passe par leurs compétences en médecine, chirurgie, obstétrique, psychiatrie, soins à domicile, Ehpad, soins de longue durée, soins de suite et de réadaptation.

Les HCS constituent ensemble un des plus gros acteurs sanitaires de la région du Grand Est avec plus d'un demi-million de prises en charge par an, 365 millions d'euros de budget, 2 646 lits et places. Ils constituent ensemble un pôle d'attractivité pour les professionnels de santé de tous horizons. Les HCS emploient plus de 4 000 professionnels qui exercent plus de 100 métiers, et forment chaque année plus d'un millier de futurs soignants, médecins et stagiaires administratifs et techniques. Ensemble, ils vont surtout permettre aux patients de bénéficier d'une offre de soin plus complète, mieux répartie géographiquement et d'une prise en charge mieux coordonnée et plus efficace. Ce n'est pas une fusion mais une nouvelle force collective dans laquelle chaque établissement continuera d'exister et sera complémentaire aux autres.

Les moyens humains des HCS en 2019 étaient composés de : 4 484 emplois, dont 404 médicaux et 4 079 non médicaux ; 1 199 étudiants, dont 798 stagiaires paramédicaux, 168 stagiaires administratifs et techniques, et 242 internes. Le budget global des HCS s'élevait à 400,7 millions d'euros en 2019, dont la répartition est donnée par la Figure 1.5. La Figure 1.6 donne la répartition des investissements sur l'ensemble des établissements des HCS avec un montant global de : 13,2 millions d'euros. Ces moyens ont permis de prendre en charge 595 355 patients avec 40 958 admissions.

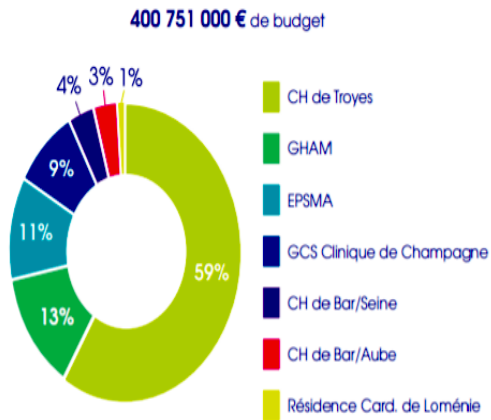


FIGURE 1.5 – Répartition du budget des HCS.

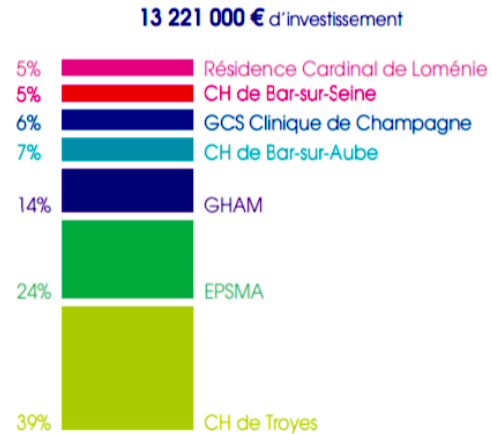


FIGURE 1.6 – Répartition des investissements des HCS.

Le CHT est un acteur clé des HCS avec un investissement chiffré à hauteur de 11,2 millions d'euros, et des dépenses d'exploitation tous budgets confondus de 237,2 millions. Le CHT est le premier employeur de l'Aube avec 203 médecins et 2 208 agents soignants, éducatifs, techniques, administratifs et médico-techniques.

Les principaux acteurs clés dans la logistique au CHT sont :

- le service intérieur,
- la plateforme logistique relais situé à Saint-Julien-les-Villas.

## Le service Intérieur du CHT

Le service intérieur est le service qui assure la gestion de la logistique quotidienne du CHT. Les missions qui lui sont confiées :

- la collecte et la livraison des différents types de flux de : repas, linge, médicaments et produits magasiniers,
- la distribution des courriers administratifs,
- la collecte et le conditionnement des déchets,
- la liaisons entre les AGV (Automated Guided vehicle) et les différents services.

Afin d'assurer les missions qui lui sont assignées, le service intérieur dispose d'un certain nombre d'agents qui effectuent des roulements quotidiens sur différents postes de travail : poste de coupure, poste de déchets, poste d'intendant, poste de chauffeur et poste d'Ucsa<sup>4</sup>. Le service intérieur réalise le roulement des agents sur ces différents postes de travail de façon à respecter le statut spécial de la fonction publique hospitalière en France et les normes Européennes sur le temps de conduite, le temps de travail et le temps de repos d'un conducteur de véhicules de plus de 3,5T.

## La plate-forme logistique relais du CHT

La plate-forme logistique a été inaugurée en 2009, à Saint-Julien-les-Villas (Figure 1.7). Elle est composée de trois secteurs :

- le magasin central qui reçoit, stocke et livre le matériel et les produits alimentaires,
- la cuisine centrale qui produit les repas des patients, des résidents et du personnel de CHT,
- la blanchisserie, qui traite le linge (tenues de travail des agents, des chemises des patients, draps, torchons, ...).

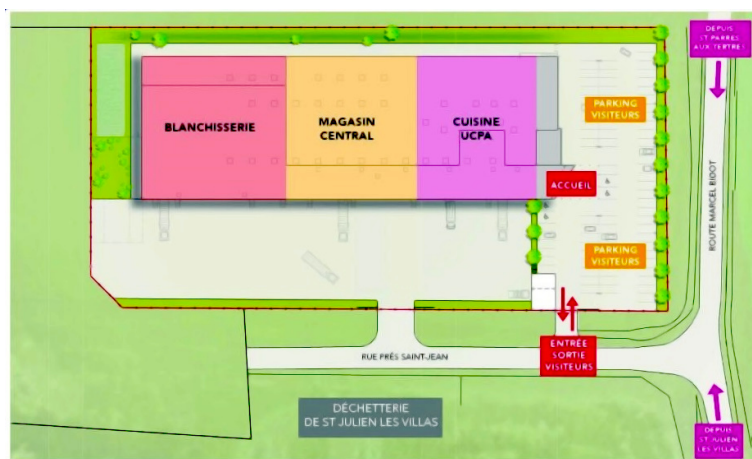


FIGURE 1.7 – Plate-forme logistique du CH de Troyes.

Le magasin central a un actif de plus de 1 000 références de produits et conditionne 5 200 mètres cubes de produits par an à destination des services de soins.

La cuisine centrale a un panel de 132 profils alimentaires, elle permet de livrer 3 000 repas par jour. Sa capacité de production est en moyenne de 5 000 repas par jour. Les établissements de santé bénéficiant des repas produits par la cuisine centrale sont :

- l'hôpital Simone Veil,
- la Résidence Comte-Henri,
- le Domaine de Nazareth,

4. Unité de consultations et de soins ambulatoires.



- l'EPSMA de Brienne le Château,
- le Groupement Hospitalier Aube-Marne,
- le Centre de Rééducation et de Réadaptation Fonctionnelle Pasteur.

Le service blanchisserie de la plateforme logistique du CHT permet de traiter 6,6 tonnes de linge par jour et par secteur, et 4 000 vêtements de travail et chemises d'opérés. L'activité du service de blanchisserie se traduit par 30 tonnes de linges lavés par semaine, et par jour : 5 000 draps et alèses lavés, 5 000 vêtements de travail et chemises, 1 250 nids d'abeilles et 1 500 sacs/éponges.

La blanchisserie du CHT est composée de 29 professionnels : agents d'entretien qualifiés, ouvriers professionnels, maîtres d'ouvriers, agents de maîtrise et techniciens. L'objectif de ce service est de réceptionner et de traiter le linge sale des patients et des résidents, tout en respectant les normes RABC<sup>5</sup> visant à maîtriser les risques liés à la biocontamination. Les agents doivent s'assurer de la propreté bactériologique et visuelle avant de le restituer. La blanchisserie permet d'assurer le traitement du linge de plusieurs établissements de santé du département de l'Aube qui sont :

- l'hôpital Simone Veil,
- le Centre de rééducation Pasteur,
- le Centre psychiatrique de l'Aube,
- le Domaine de Nazareth,
- le CH de Bar-sur-Aube,
- le CH de Bar-sur-Seine,
- l'EPSMA de Brienne le Château,
- la résidence Pierre d'Arcis,
- la résidence Delatour.

## 1.3 **Projet de recherche CHT-UTT**

### 1.3.1 **Contexte du projet**

Depuis quelques années, le CHT a mené plusieurs projets afin d'améliorer la qualité de ses services. Le domaine des recherches fait partie de ses orientations pour assurer un meilleur service. En effet, il s'avérait nécessaire de faire appel à l'expertise des centres de recherche universitaires. Dans ce contexte, le CHT mène une collaboration avec l'Université de Technologie de Troyes depuis 2014, afin de lancer des projets de recherche visant à l'amélioration des différents processus des services du CHT, parmi eux le projet mené dans le cadre de cette thèse, visant d'une part l'amélioration du bien-être et des conditions de travail des employés, et d'autres part l'amélioration des activités du service de restauration, en s'appuyant sur des techniques d'optimisation issues du domaine industriel.

---

5. Risk Analysis Bio-contamination Control.



### 1.3.2 Objectifs et enjeux

Les objectifs et les enjeux principaux de ce projet de recherche sont orientés principalement vers l'analyse et la mesure du bien-être au travail dans le service de restauration du centre hospitalier de Troyes. L'analyse a consisté à :

- mettre en évidence les dimensions du bien-être au travail les plus importantes pour le personnel concerné,
- identifier parmi les différentes dimensions celles qui ont un impact important sur le niveau du bien-être des employés,
- proposer des solutions et des axes pour améliorer le bien-être et les conditions de travail des employés du service de restauration,
- mettre en place les solutions et les axes d'amélioration proposés et suivre l'évolution du bien-être et des conditions de travail des employés.

### 1.3.3 Étude empirique

L'étude empirique est réalisée par le biais des enquêtes et des sondages auprès du personnel concerné et des questionnaires sur le bien-être et les conditions de travail des employés ont été élaborés. Ces questionnaires comprenaient plusieurs questions réparties en plusieurs thèmes. Ces derniers ont été distribués aux employés du service de restauration. L'anonymat a été préservé, seule l'équipe de recherche concernée par cette étude a eu accès aux réponses des sondages. La plupart des personnes ayant répondu aux questionnaires étaient des hommes, ce qui correspond à la majorité de la population des employés du service de restauration du centre hospitalier de Troyes. L'âge des participants varie entre 26 ans et 57 ans, et leur ancienneté aux postes de travail varie entre 5 mois et 28 ans. Les employés ont été motivés par le fait que l'hôpital a annoncé que les sondages sont réalisés dans le but d'améliorer les conditions quotidiennes du travail et pour favoriser leur bien-être. L'Annexe [A.1](#) présente une synthèse des résultats de ces sondages. Comme le montre cet annexe, les questionnaires ont été composés de plusieurs questions réparties sur plusieurs thèmes, à savoir la charge de travail, la nature du travail et plus généralement des questions sur la qualité de vie quotidienne des employés. Pour chaque thème, une analyse a été réalisée afin d'identifier les points de satisfaction et de non satisfaction des employés. Les histogrammes en "vert" représentent les pourcentages de satisfaction des employés sur les différents points de chaque thème et les histogrammes en "bleu" correspondent aux pourcentages de non satisfaction des employés.

### 1.3.4 Problématiques

Les problématiques visées dans ce projet de recherche, soulevées suite aux sondages sur le bien-être au travail sont multiples et se rencontrent au niveau de différents axes. En effet, d'après les résultats des sondages sur le bien-être au travail, présentés en Annexe [A.1](#), on remarque que les forts pourcentages de non satisfaction des employés et les facteurs affectant leurs conditions de travail

et leur bien-être sont liés plus spécifiquement au manque d'organisation et à la charge de travail quotidienne. Ces résultats montrent également que les conditions de travail insatisfaisantes ont un impact négatif sur le bien-être physique et psychologique des employés.

Pour atténuer ces facteurs et contribuer ainsi à l'amélioration des conditions de travail du personnel concerné, un plan d'action a été élaboré et des solutions ont été proposées.

Pour les points de non satisfaction des employés des indicateurs du bien-être au travail ont été proposés, afin de suivre leur évolution suite à la mise en place des axes d'amélioration proposés. La Table 1.1 présente l'ensemble de ces indicateurs avec quelques chiffres relevés pour chaque indicateur :

- concernant le point portant sur l'organisation du travail, l'indicateur est le temps de présence total des tâches dans le système de production, où une tâche correspond à la préparation d'un plat ;
- l'indicateur de performance pour le port des charges lourdes et manutention est le poids et la fréquence des charges portées par les agents ;
- pour le point visant l'équipement contre le froid, l'indicateur proposé est les vêtements fournis aux agents pour le travail en chambres de production froide et d'expédition ;
- concernant le point lié à la charge de travail comporte des périodes de suractivité, l'indicateur de performance représente l'écart en pourcentage entre la quantité des plats préparés et la capacité maximale de production ;
- l'indicateur de performance proposé pour quantifier la charge physique correspond à la quantité des tâches affectées à un employé ;
- l'écart entre les demandes de repas prévisionnelles et réelles sur un horizon donné représente l'indicateur de performance pour mesurer la charge et le travail dans l'urgence ;
- concernant les points liés au stress et l'impact du travail sur la santé des employés, l'indicateur est le nombre de jours annuel d'arrêts de maladies et de travail.

Point de non satisfaction :	Indicateur :	Point de non satisfaction :	Indicateur :
<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ <b>Organisation du travail</b></li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Temps de séjour des tâches dans le système de production</li> <li>• Exemple 19 Juin 2019 : Flow time : <b>901,97 h</b></li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ <b>Période de suractivité</b></li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Écart en pourcentage entre la quantité des plats préparés et la capacité maximale de production</li> <li>➢ Exemples :</li> <li>• <u>Lundi 09/12/2019</u> : <b>47,60 %</b></li> <li>• <u>Mercredi 11/12/2019</u> : <b>34,35 %</b></li> </ul>
<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ <b>Charge lourdes et manutention</b></li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Poids et fréquence des charges portées</li> <li>• <b>25 kgs</b> au maximum pour les femmes (réglementation du port de charges)</li> <li>• <b>55 kgs</b> au maximum pour les hommes (réglementation du port de charges)</li> <li>• Fréquences des charges</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ <b>Charge physique importante</b></li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Quantité des tâches affectée à un employé</li> </ul>
<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ <b>Équipements contre le froid</b></li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Vêtements fournis aux agents pour le travail en chambres froides</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ <b>Trop de travail en urgence</b></li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Écart entre les demandes prévisionnelles et les demandes réelles par jour, par semaine, par mois, par an</li> <li>➢ Exemples :</li> <li>• <u>Lundi 09/12/2019</u> : <b>4,02 %</b></li> <li>• <u>Mardi 10/12/2019</u> : <b>1,67 %</b></li> </ul>
<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ <b>Nombre de réunions de service est insuffisant</b></li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Nombre de réunions par an</li> <li>1 réunion par an</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ <b>Travail a un impact sur la santé</b></li> <li>▪ <b>Travail stressant</b></li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Nombre de jours d'arrêts maladie : <u>2018</u> : <b>728 jours</b>, <u>2019</u> : <b>737 jours</b></li> <li>▪ Nombre de jours d'arrêts de travail : <u>2018</u> : <b>31 jours</b>, <u>2019</u> : <b>61 jours</b></li> </ul>

TABLE 1.1 – Indicateurs du bien-être au travail.

Dans le cadre de nos travaux de recherche, nous nous focalisons particulièrement sur l'optimisation de l'organisation du travail. Notre étude a pour but de déterminer le meilleur plan pour répondre aux demandes des clients en termes de flux alimentaires et de proposer des outils d'aide à la décision permettant d'ordonnancer les processus de production alimentaire et de mieux organiser les activités quotidiennes du service de restauration. La réflexion sur ce choix pour traiter ce problème en premier réside dans le fait que l'étape de la planification de la production sur la semaine avec l'équilibrage de la charge de travail sur les journées nécessite au préalable d'un outil d'ordonnancement robuste permettant d'évaluer la faisabilité de la planification à la journée.

Une des spécificités de la restauration hospitalière est l'existence de nombreux régimes alimentaires censés répondre à certaines pathologies et aux différences d'âges des patients. Force est de constater que les variétés de ces régimes constituent une importante source de complication et de complexité pour l'organisation des processus de production des repas. Cet inconvénient majeur ne paraît pas contrebalancé par une justification scientifique appropriée. Une révision sans concession et une simplification de ces pratiques ne pourraient être que bénéfiques aux patients comme au service de restauration.

En plus de la variété des profils alimentaires et de la multitude des régimes et des plats à produire, la restauration hospitalière est contrainte par plusieurs autres paramètres, ce qui rend l'organisation de la production alimentaire d'autant plus complexe et difficile. Parmi ces paramètres, la variation de la demande des repas (Figure 1.8) et l'écart considérable entre les quantités des plats produits par jour, ce qui influence grandement l'organisation hebdomadaire de la production et engendre une charge de travail importante pour certaines journées de production par rapport à d'autres, tel que le montre la Table 1.2. Cette Table présente les quantités des plats produits par jour sur un exemple d'une semaine de production. À travers cet exemple, on peut observer les écarts importants entre les quantités des plats fabriqués par jour. En effet, les journées du lundi, mercredi et vendredi représentent des journées plus chargées par rapport au mardi et jeudi.

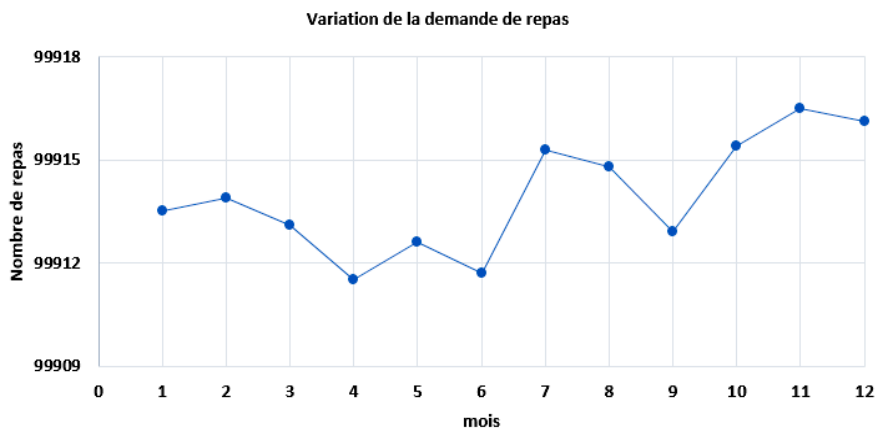


FIGURE 1.8 – Historique de la demande des repas par an.

Jour de production :	Lundi :		Mardi :		Mercredi :		Jeudi :		Vendredi :	
▪ Nombre total des plats (chauds et froids)	Plats chauds :	Plats froids :	Plats chauds :	Plats froids :	Plats chauds :	Plats froids :	Plats chauds :	Plats froids :	Plats chauds :	Plats froids :
		33	36	12	26	32	33	9	29	21
▪ Quantité totale des plats (en nombre de portions)	9 804	9 542	3 456	5 645	11 109	7 617	2 676	5 536	8 270	5 978

TABLE 1.2 – Quantités des plats produits par jour sur un exemple d’une semaine de production.

### 1.3.5 Verrous scientifiques et techniques

Les travaux de recherche menés dans le cadre de cette thèse, nécessitent d’aborder conjointement plusieurs problématiques ayant des relations de contraintes les unes avec les autres. Il s’agit en effet de traiter des problèmes complexes, visant la planification et l’ordonnancement des processus de production alimentaire en restauration hospitalière, en mettant l’accent sur l’amélioration des conditions de travail et le bien-être des employés. Des modèles et des méthodes existent pour répondre à ces problèmes dans différents domaines d’application, à l’exception la restauration hospitalière ou plus généralement la restauration collective. Une autre originalité de cette étude vient du domaine d’application à l’hôpital. Des études existent déjà dans le domaine hospitalier, mais la problématique étudiée dans le cadre de cette thèse avec l’intégration du facteur humain et la prise en compte de plusieurs contraintes spécifiques à ce domaine, n’était pas traitée dans la littérature. Ainsi, le but de cette étude est de développer des techniques et des outils d’aide à la décision qui permettent, en fonction du problème traité, de proposer des solutions d’amélioration rapides et performantes.

### 1.3.6 Méthodologie et démarche

Pour mener à bien cette étude et atteindre nos objectifs, nous avons réalisé dans un premier temps un travail d’analyse de l’existant sur le réseau logistique du centre hospitalier de Troyes et de collecte d’informations et de données sur le terrain. Parallèlement, nous avons effectué une recherche bibliographique sur les différentes problématiques visées dans cette thèse. L’étape suivante a consisté à développer des modèles mathématiques et des méthodes d’optimisation efficaces, afin de proposer des outils d’aide à la décision permettant de répondre aux différentes problématiques visées dans le cadre de cette thèse, tout en optimisant certains critères et en prenant en considération différentes contraintes. Ces méthodes sont de nature exacte, pour les problèmes de petite taille, ou approchée de type heuristique et métaheuristique, pour les problèmes de grande taille. La dernière étape est la mise en place et l’application des différentes techniques et outils développés au sein de la gestion logistique du centre hospitalier de Troyes.

Dans la partie suivante, nous présenterons le secteur de la restauration hospitalière du CHT, et ses particularités liées à l'environnement caractéristique du monde hospitalier, qui génère une organisation particulièrement exigeante. C'est pourquoi nous tenons, dans un premier temps, à décrire dans la section suivante, tous les tenants et aboutissants de cet environnement, ainsi que le système de restauration permettant la production des repas.

## 1.4 Présentation du service de restauration et la cuisine centrale

### Ouverture de l'Unité Centrale de Production Alimentaire

Les repas servis aux patients sont fabriqués à l'Unité Centrale de Production Alimentaire (UCPA) (Figure 1.9) du CHT, située à Saint-Julien-les-Villas. Ouverte depuis novembre 2009, la cuisine centrale produit aussi des repas, à travers une structure de coopération inter-hospitalière, le G.I.P<sup>6</sup> logistique inter-hospitalier de l'Aube, pour l'E.P.S.M.A<sup>7</sup> de Brienne-Le-Château sur ses différents sites de Troyes, Romilly-sur-Seine et Brienne et pour le Centre de Rééducation et Réadaptation Fonctionnelle Pasteur à Troyes.

L'ouverture de l'UCPA a permis de centraliser la production alimentaire des différents services hospitaliers de court et de long séjour, ainsi que des restaurants du personnel hospitalier. Elle a donc permis de mutualiser les réceptions, la production, les stockages et les expéditions des repas à destination des patients, des clients du self et des sites extérieurs.



FIGURE 1.9 – Unité centrale de production alimentaire du CHT.

La réflexion engagée par le CHT sur la réorganisation des fonctions de restauration depuis 2004, a conduit à l'ouverture, en novembre 2009, d'une nouvelle cuisine centrale, qui réunit les activités de production alimentaire et de distribution des repas pour les sites clients du CHT. Un tel regroupe-

---

6. Groupement d'Intérêt Public.

7. Etablissement Public de Santé Mentale de l'Aube.

ment a permis en effet, d'améliorer la qualité de prestation et de service, les conditions de travail, de gagner en espace et en efficacité, et de mieux gérer et maîtriser les coûts d'exploitation.

Le service de restauration du CHT est une équipe de professionnels constituée de 45 personnes, se répartissant entre 27 postes de travail (temps plein) du lundi au vendredi et 7 postes (temps plein) en fin de semaine. À cela s'ajoute une équipe de 4 postes (2 temps plein et 2 mi/temps) détachée au restaurant du personnel et à l'internat. Les agents travaillent 35 heures par semaine équivalent à 7h30 par jour. Les temps de pause sont de 30 mn à 1 heure, selon le poste de travail. L'Annexe A.4 présente l'organisation du service de restauration. L'organigramme fonctionnel de l'UCPA est présenté en Annexe A.3. Dans cet organigramme, on trouve au sommet de la hiérarchie, le responsable de restauration en charge de ce service. Ce dernier permet d'assurer une bonne coordination des ressources et du fonctionnement du service de restauration. Il est épaulé par des cadres techniques qui sont des responsables de production, d'expédition et de magasin alimentaire.

Dans le cadre de son exploitation, le service de restauration travaille en étroite collaboration avec le service diététique, en charge de l'aspect nutrition, le service informatique pour la gestion de production et de commandes, les équipes de soins pour la prise de commande des repas et la distribution aux patients, ainsi que le service technique pour la maintenance du matériel et des locaux.

L'UCPA dispose d'une superficie utile de 1 616 m<sup>2</sup>, dont 1 325 m<sup>2</sup> est dédiée au processus de production sur un seul niveau. Le dimensionnement est prévu pour 5 000 repas/jour sur 5 jours de production, et pour une organisation de la distribution 7j/7 en plateaux-repas et plats collectifs. Près de 35 000 repas sont servis par semaine, aux différents sites du CHT. Les Tables 1.3 et 1.4 représentent le nombre moyen de repas produits et stockés par jour sur un exemple d'une semaine de production.

Jours de production	Jours de repas	Nombre de repas
Lundi	Mardi midi + Mardi soir + Mercredi midi	9 236
Mardi	Mercredi soir + Jeudi midi + Jeudi soir	7 507
Mercredi	Vendredi midi + Vendredi soir + Samedi midi	7 856
Jeudi	Samedi soir + Dimanche midi + Dimanche soir	6 027
Vendredi	Lundi midi + Lundi soir	5 581

TABLE 1.3 – Nombre moyen de repas produits par jour de production sur un exemple d'une semaine de production.

Jours de stockage	Jours de repas à stocker	Nombre de repas stockés
Lundi	Mardi midi + Mardi soir + Mercredi midi	9 236
Mardi	Mercredi midi + Mercredi soir + Jeudi midi + Jeudi soir	11 162
Mercredi	Jeudi midi + Jeudi soir + Vendredi midi + Vendredi soir + Samedi midi	13 437
Jeudi	Vendredi midi + Vendredi soir + Samedi soir + Dimanche midi + Dimanche soir	13 883
Vendredi	Samedi midi + Samedi soir + Dimanche midi + Dimanche soir + Lundi midi + Lundi soir	13 882
Samedi	Dimanche midi + Dimanche soir + Lundi midi + Lundi soir	9 732
Dimanche	Lundi midi + Lundi soir	5 581

TABLE 1.4 – Nombre moyen de repas stockés en chambre froide PCEA sur un exemple d'une semaine de production.

L'UCPA fonctionne selon la marche en avant (Annexe A.5), qui est basée sur le principe d'une conception en U. En effet :

- les locaux sont sur un seul niveau pour la production avec deux entrées distinctes, l'une pour les livraisons et l'autre pour le personnel ;
- les vitrages sont dans les cloisons pour un travail plus collectif ;
- les vitrages sont sur l'extérieur pour la zone de production chaude ;
- les sols sont en carrelage antidérapant dans toutes les zones ;
- les murs et les cloisons sont lisses pour faciliter les tâches de nettoyage.

### Fonctionnement du service de restauration

L'UCPA a pour fonction d'assurer la production, et la distribution d'environ 1 200 000 repas par an, soit une production d'environ en moyen 4 800 repas par jour avec un fonctionnement de 7j / 7j de 06h30 à 16h45. Ces repas sont à destination : des patients et des personnels du centre hospitalier en général de Troyes, des résidents des établissements pour les personnes âgées, ainsi que des patients et des personnels des établissements de santé mentale.

Les repas produits sont adaptés au profil de chaque patient ou résident. En effet, une diététicienne est chargée en étroite collaboration avec le chef cuisinier, de l'élaboration des menus, et de leur déclinaison selon les régimes et les textures, adaptés à la pathologie de chaque patient, répartis au total en 138 profils alimentaires distincts. À l'aide d'un logiciel, appelé "Winrest GPAO", la commande des repas est réalisée par le personnel soignant, directement au chevet des patients, en prenant en compte leurs goûts, leur identité culturelle et religieuse, tout en respectant leur régime alimentaire.

Afin de garantir le respect d'exigences sanitaires, le travail d'élaboration des repas est organisé de façon à éviter toute contamination microbienne, et les normes sanitaires évoluent sans cesse. En effet, depuis 2006, la restauration hospitalière est soumise à une réglementation européenne : le "Paquet Hygiène" qui fixe une obligation de résultats en termes de traçabilité des produits, de respect des bonnes pratiques et de maîtrise des risques (la démarche HACCP<sup>8</sup>).

En outre, un Plan de Maîtrise Sanitaire a été établi à l'ouverture de la nouvelle cuisine centrale et sa bonne application est régulièrement contrôlée par les agents des services vétérinaires, ce qui permet à l'établissement de bénéficier d'un agrément sanitaire européen pour les activités de la cuisine centrale. L'Unité centrale de production alimentaire respecte également les directives définissant les apports nutritionnels, par type de population et les fréquences à laquelle les différents types de plats doivent entrer dans les menus, garantissant ainsi l'équilibre alimentaire pour chacun.

La réponse aux attentes alimentaires et aux besoins nutritionnels des patients et résidents mobilise 7 jours sur 7 de nombreux professionnels de différents métiers, de la conception des menus et l'achat des denrées alimentaires, jusqu'à la distribution des plateaux de repas, en passant par le transport en chariot isotherme et camions réfrigérés : acheteurs, ingénieurs et cadres en restauration hospitalière, magasiniers, médecins, diététiciens, cuisiniers, aides-soignants, chauffeurs, etc.

L'alimentation à l'hôpital est donc complexe à gérer, malgré son apparente simplicité. Et même si la fonction restauration n'est pas directement au contact du patient, elle est bien au service de celui-ci. Faire en sorte que l'instant du repas soit un moment de plaisir pour le patient hospitalisé ou le résident d'une maison de retraite est une préoccupation constante des cuisiniers hospitaliers, même si les contraintes liées à l'organisation des soins ou au suivi des traitements médicaux influencent la perception de l'alimentation servie.

### **Les différents secteurs du service de restauration**

Le service de restauration du CHT comprend une unité de production, qui se divise en plusieurs secteurs et une cellule de coordination pour la gestion des menus. Les différents secteurs sont :

- Magasin alimentaire : ce secteur se situe en amont de la production. Il supervise les approvisionnements des denrées alimentaires, la gestion du stock existant en fonction des besoins de l'unité de production et le suivi des dates limites de consommation (DLC) et d'utilisation optimale (DLUO). Il se divise en trois ateliers :
  - Atelier de réception des matières premières : cet atelier a comme principales missions :
    - réception, contrôle et stockage avec emballage des produits alimentaires, diététiques et d'entretien,
    - stockage des produits en chambre froide positive ou négative, congélateur ou réserve en épicerie,

---

8. Hazard Analysis Critical Control Point : analyse des dangers - points critiques pour leur maîtrise.



- traçabilité et comptage des produits en circuit court (produits ne nécessitant pas de transformation ni de conditionnement tels que : purée de fruits, yaourt, ...).
- Atelier de prise de commande : cet atelier est doté d'un système de prise de commande informatisé Winrest GPAO, permettant de gérer les commandes des matières premières. Ce dernier est déployé sur l'ensemble des sites de distribution des repas.
- Atelier de pré-traitement des matières premières : dans cet atelier les matières premières sont préparées et prétraitées avant de passer en production. Ses principales missions sont :
  - désinfection des boîtes de conserve, désouvidage, désensachage, déboîtage, décartonnage, décongélation et plaquage des produits pour les différents secteurs,
  - traitement des fruits et légumes.
- Secteur de production : il constitue le noyau de l'UCPA. Il se divise en quatre zones :
  - Zone de préparation froide (Figure 1.10) : la production froide fonctionne 5 jours sur 7 (sauf cas exceptionnel de jours fériés). Elle s'effectue entre 1 et 3 jours avant la date de consommation, selon la nature des produits. Cette zone de production permet de gérer :
    - la préparation et le conditionnement des hors d'œuvre, charcuterie, fromages, desserts, etc. Le conditionnement des plats froids est exclusivement réalisé en barquettes à usage unique, dont 70 % de la production froide est conditionnée en barquette individuelle et 30 % en barquette collective.
    - le tranchage des viandes, des charcuteries, etc.
    - la préparation et le conditionnement des pâtisseries.



FIGURE 1.10 – Zone de production froide +12°C.

- Zone de préparation chaude (Figure 1.11) : tout comme la production froide, la production chaude fonctionne aussi 5 jours sur 7. Elle est réalisée en général 3 jours avant le jour de consommation. Cette zone de production est composée de plusieurs ressources de cuisson (voir Annexe A.15) et elle permet de gérer :

- la production des plats cuisinés : cuisson, assaisonnement et assemblage des denrées alimentaires,
- l'opercutage et conditionnement en barquettes individuelles (50 % de la production) ou plats collectifs (50 % de la production),
- le refroidissement en cellules (Figure 1.12) des produits alimentaires après la cuisson.



FIGURE 1.11 – Zone de production chaude.



FIGURE 1.12 – Zone de refroidissement des produits après cuisson.

- o Zone de stockage et expédition des PCEA<sup>9</sup> (Figure 1.13) : cette zone gère le stockage, l'allo-  
tissement et l'expédition des plats par destinataires.



FIGURE 1.13 – Zone de stockage et d'expédition des PCEA +3°C.

9. Plat Cuisiné et Élaboré à l'Avance.

- Zone laverie et plonge batterie (Figure 1.14) : dans cette zone sont réalisées les tâches de laverie, qui comprennent le lavages des plateaux de retour des sites livrés, le nettoyage et la désinfection des chariots en tunnel de lavage 2 fois/jour, le lavage des cagettes. Cette zone permet également de gérer la plonge batterie des secteurs de production et de magasin alimentaire.



FIGURE 1.14 – Zone de laverie des plateaux de repas, cagettes et chariots.

- Secteur de distribution : ce secteur fait le lien entre la production et les différents consommateurs de l'hôpital. Il dispose de personnel s'occupant du service pour le Self et l'Internat, de personnel pour l'assemblage des plateaux, la distribution des navettes de repas et la laverie. La distribution s'effectue selon un planning d'expédition (voir Annexe A.13) et elle se réalise en plusieurs modes :
  - en plateaux individuels (voir Annexe A.14) : la chaîne de montage plateaux et d'expédition (Figure 1.15) a lieu 2 fois par jour et 7 jours sur 7. Ceci représente environ 620 plateaux le midi et 560 le soir.
  - en conteneur isotherme, qui sont allotis par service : pour ce mode de distribution, l'expédition se fait 2 fois par jour et 7 jours sur 7.
  - en vrac pour le restaurant du personnel de l'hôpital : l'expédition se fait 1 ou 2 fois par jour, du lundi au vendredi.
  - en cagettes allotis par service : concernant ce mode de distribution, l'expédition s'effectue une fois par jour du lundi au samedi ou deux fois par jour, 7 jours sur 7, ceci dépend du client destinataire. Les expéditions se font en camion frigorifique.



FIGURE 1.15 – Zone de montage et assemblage des plateaux-repas +12°C.

## 1.5 Le système de restauration et organisation de la production

Cette section vise à étudier le concept du système de restauration du Centre Hospitalier de Troyes. Poulain and Larrose [1] définissent le système de restauration, comme une combinaison complexe d'un concept de fabrication, d'un mode de liaison, d'une offre de restaurant, d'un mode de dressage et de conditionnement, et d'un mode de distribution. Ceci représente pas moins d'une centaine de systèmes de base possibles, ce qui montre l'extrême diversité des contextes technologiques dans lesquels se déploie l'ingénierie de restauration (Poulain and Larrose [1]). La Figure 1.16 illustre le schéma général d'un système de restauration.

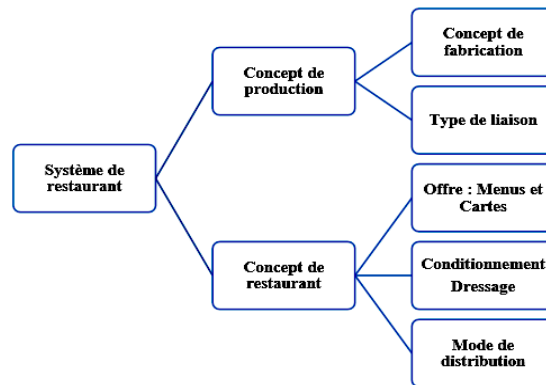


FIGURE 1.16 – Système de restauration, source : Poulain and Larrose [1].

### 1.5.1 Typologie de clientèle

L'unité centrale de production alimentaire produit en moyenne 4 800 repas par jour, déjeuner et dîner compris. La Figure 1.17 représente la répartition quotidienne de ces repas pour l'ensemble des sites livrés :

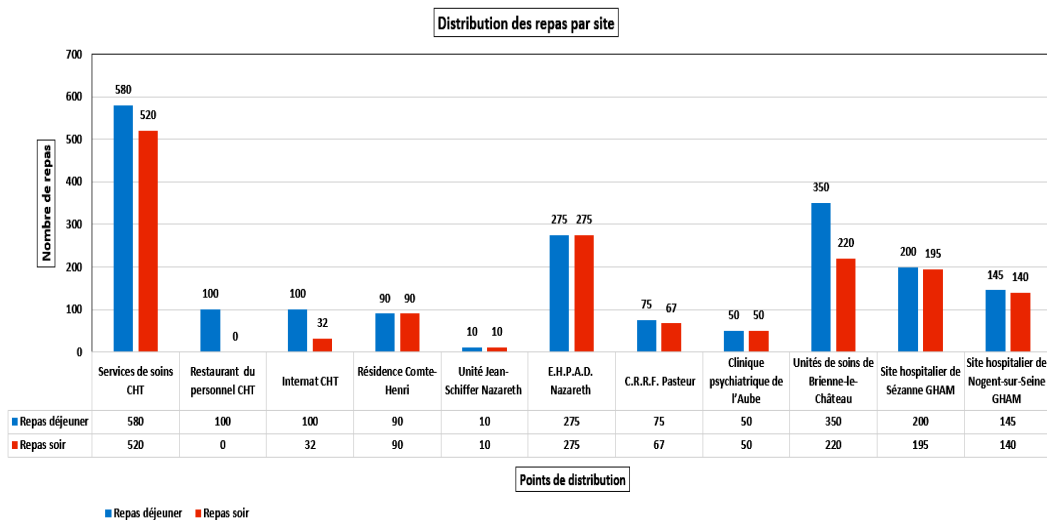


FIGURE 1.17 – Sites de distribution des repas de déjeuner et dîner.



Le mode de distribution des repas dépend du client destinataire. En effet, les repas préparés en conditionnement unitaire<sup>10</sup>, sont mis en cagettes et envoyés sur un socle rouleur à la chaîne d'assemblage, pour l'allotissement des plateaux-repas. Les plateaux de repas sont ensuite livrés dans des chariots bi-température, dans les offices alimentaires des unités de soins pour la remise en température. Concernant le restaurant du personnel de Self, les repas sont préparés en bacs gastronomes GN<sup>11</sup> 1/1, et livrés dans des chariots isothermes. La remise en température s'effectue au Self par le biais de ces chariots à air pulsé pour les plats chauds. Le flux tendu est également utilisé pour les cuissons de dernière minute (poisson, frite, steak, etc.). Les produits subissant les cuissons de dernière minute proviennent de l'UCPA par le circuit court. Pour les autres sites (Internat, Ehpad, ...), les repas sont préparés en conditionnement collectif en barquettes plastiques operculées GN 1/2, et livrés en chariots isothermes ou en cagettes sur socle rouleur. La remise en température s'effectue dans les sites destinataires par le biais des chariots bi-température à air pulsé.

### 1.5.2 Typologie des prestations

La fonction restauration hospitalière est une prestation multiforme, car elle recouvre les activités de restauration des patients hospitalisés et du personnel hospitalier, du petit-déjeuner au dîner, en incluant les collations pour les employés de nuit (Cosson [31]). Ainsi, les prestations fournies varient selon que le consommateur final est un patient hospitalisé, client du restaurant de personnel ou de l'Internat.

#### Prestation alimentaire pour les patients

La politique de l'établissement accorde une importance particulière à la qualité des repas fournis aux patients, et au respect des apports nutritionnels liés à leurs pathologies. Le concept de restauration à l'hôpital doit permettre aux clients de se restaurer, tout en garantissant une meilleure qualité gustative, une variété des menus proposés et en respectant leurs goûts et choix. Ce composant est parfaitement compatible avec les recommandations nutritionnelles et l'équilibre alimentaire en vigueur en France (PNNS<sup>12</sup>, GEMRCN<sup>13</sup>). Les documents de référence servant de base à l'élaboration des menus de tous les repas principaux (déjeuners et dîners) sont les recommandations du GEMRCN du 4 mai 2007.

Concernant le menu standard, les déjeuners et les dîners présentent systématiquement 5 composantes (les plats complets comptant pour 2 composantes) :

- une entrée/apéritif : cuidités, crudités, charcuteries, salade composée, légumes secs ou autres féculents, entrées protidiques (œuf, poisson), pâtisseries salées.

---

10. Barquettes individuelles operculées.

11. Gastro Norm : est un standard utilisé en restauration collective.

12. Programme National Nutrition Santé.

13. Groupe d'Etude des Marchés Restauration Collective et Nutrition.

- un plat protidique/protéiné : plat principal à base de viande, de poisson ou d'œufs, pâtisserie salée servie en plat principal (tarte, quiche, etc), charcuterie servie en plat principal<sup>14</sup>.
- un plat d'accompagnement composé de légumes et de féculents.
- un produit laitier : fromage (pâte molle, ferme, fondue, persillée), lait fermenté ou autre produit laitier frais, dessert lacté.
- un dessert : fruits crus entiers ou en salade, fruits cuits ou au sirop, pâtisserie, biscuit, etc.
- à ces composantes s'ajoutent un pain individuel et de l'eau.

Quelles que soient les composantes du menu, celui-ci comportera toujours un fruit ou un légume cru. Les menus standards sont déclinés selon les principaux régimes utilisés par le service de restauration.

La prise en compte des goûts et des aversions alimentaires des patients participe à prévenir et prendre en charge la dénutrition. À ce titre, le CHT présente systématiquement une carte de remplacement composée de cinq plats fixes pour les entrées, les viandes et les légumes, correspondant à des produits constants. Pour les légumes, les plats de remplacement sont adaptés en fonction de l'assaisonnement, qui peut être nature ou normal et de la texture. Pour les autres composantes du repas, une liste des constantes est proposée. Par exemple :

- entrée nature : salade verte, carotte râpée, jambon, œuf dur, pâté de campagne, etc.
- viande nature : steak haché grillé, poulet rôti, colin, tarte au fromage, dinde hachée, etc.
- légume nature ou normal : coquillettes, riz, purée, carotte, haricot vert, purée de carotte et purée d'haricot vert.
- produit laitier : crème de gruyère, camembert, emmenthal, yaourt nature, yaourt aromatisé, fromage blanc nature, lait gélifié, crème dessert, entremets enrichi, etc.
- dessert : fruit, madeleine, biscuit, jus de fruits, coupelle de fruits, etc.

Des plats dits "plats de carte fixe" sont prévus tous les jours, les week-ends compris. Ils s'adaptent à presque tous les régimes. Ces plats sont pris sur le stock tampon. En effet, l'UCPA détient en permanence un stock tampon, les quantités étant définies en amont, et le consomme en dernier recours, en cas d'aléas d'approvisionnement, de production ou de demande particulière. Cet inventaire reflète la disponibilité de nourriture alimentaire pour les patients. Le service de restauration est ainsi sûr de pouvoir répondre à la demande.

### **Prestation alimentaire pour les clients du Self et Internat**

Si la restauration du personnel ne répond pas aux mêmes exigences en terme de respect du plan alimentaire, la cuisine centrale souhaite que les exigences décrites ci-dessus pour les patients s'appliquent également pour les clients du Self, ceci en garantissant, la qualité gustative et diversifiée des repas servis, et en respectant les choix et les goûts alimentaires des clients. La prestation alimentaire

---

14. Préparation traditionnelle à base de chair de boudin, porc, saucisses diverses.

systématiquement proposée pour le restaurant du Self est présentée en Annexe A.10. La prestation alimentaire proposée pour les clients du restaurant de l'Internat se basent en général sur celle du restaurant du Self.

### 1.5.3 Typologie des produits matières premières

Le terme "typologie des produits" désigne la nature des produits utilisés dans les processus de production définis dans le PMS<sup>15</sup>. Ces produits peuvent être distingués en six grandes familles selon la classification établie par Poulain and Larrose [1]. La différence entre ces familles de produits alimentaires réside dans la nature des traitements qu'ils ont subis :

- les produits de 1<sup>ère</sup> gamme : il s'agit des produits crus traditionnels, qui n'ont subi aucune transformation, nécessitant des conditions de stockage précises et rigoureuses en termes de température et d'hygrométrie, afin d'éviter des souillures éventuelles et des transferts d'odeurs.
- les produits de 2<sup>ème</sup> gamme : représentent les produits appertisés<sup>16</sup>. Autrement dit, ce sont les aliments conditionnés dans des emballages étanches au liquide, au gaz et au micro-organisme, et ayant subi un traitement thermique susceptible de détruire la flore bactérienne.
- les produits de 3<sup>ème</sup> gamme : cette gamme représente les produits stockés en réfrigération négative, ils sont généralement pré-traités (épluchage, blanchiment, ...), conditionnés dans des emballages non étanches (carton, sachet plastique), et conservés à -18°C.
- les produits de 4<sup>ème</sup> gamme : dans cette gamme sont regroupés les produits végétaux qui ont subi un pré-traitement (épluchage, parage, coupage, etc) et qui sont prêts à l'emploi. Ils sont conditionnés en emballage étanche et conservés à des températures inférieures à + 4°C en atmosphère contrôlée ou raréfiée (sous-vide).
- les produits de 5<sup>ème</sup> gamme : cette gamme de produits comprend les aliments cuits prêts à être servis. Ils sont conditionnés sous atmosphère raréfiée (avant ou après cuisson) et sont conservés à + 3°C.
- les produits semi-élaborés : cette catégorie de produits appartient au secteur de l'épicerie sèche, très souvent déshydratés, qui permettent d'effectuer des préparations culinaires de manière simplifiée par rapport au cycle normal de production (jus, sauce, crèmes à froid, ...).

Les figures ci-dessous répertorient les produits utilisés par l'UCPA, en les distinguant les uns des autres selon les composantes du repas et les gammes des matières premières :

---

15. Plan de maîtrise sanitaire.

16. Produits en conserves et en semi-conserves

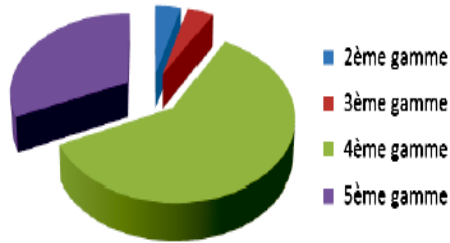


FIGURE 1.18 – Répartition des ENTREES selon les gammes.

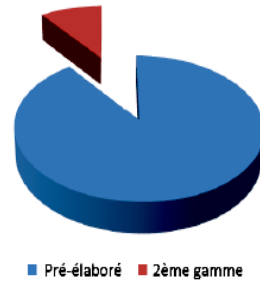


FIGURE 1.19 – Répartition des VIANDES selon les gammes.

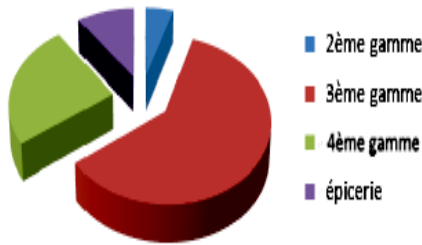


FIGURE 1.20 – Répartition des GARNITURES selon les gammes.

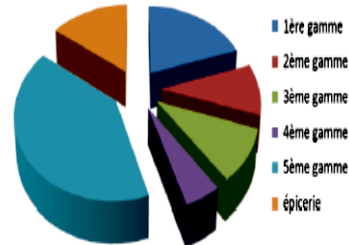


FIGURE 1.21 – Répartition des DESSERTS selon les gammes.

Le choix des gammes de matières premières utilisées, se fait en fonction du budget des denrées alimentaires et de l'organisation de la cuisine. En effet, ayant un grand nombre de repas à servir, il est préférable d'utiliser des produits déjà précuits ou qui nécessitent un minimum de préparations afin d'assembler les éléments rapidement et de pouvoir produire la quantité de repas demandée en temps voulu, pour élargir la gamme des produits présentés au patient, et ainsi réduire les redondances.

La nature des produits introduits dans une cuisine collective détermine le mode d'organisation et les équipements requis. D'après Poulain and Larrose [1], on peut distinguer quatre modes d'organisation : la cuisine traditionnelle, la cuisine traditionnelle avec assemblage d'opportunité, la cuisine d'assemblage et la cuisine 4.5.

La majorité des produits utilisés au sein de l'UCPA sont pré-élaborés, nécessitant peu de préparations préliminaires. Ainsi, le schéma d'organisation utilisé est la cuisine d'assemblage. La Figure 1.22 illustre le schéma général de ce type d'organisation. Selon Poulain and Larrose [1], cette organisation vise à utiliser des produits semi-finis, voire prêts à l'emploi, nécessitant quelques phases de cuisson et de finition. Ce type d'organisation de production a pour but de réaliser des gains de productivité en libérant le personnel cuisinier de certaines tâches préliminaires telles que : le parage, l'épluchage, le lavage, etc.



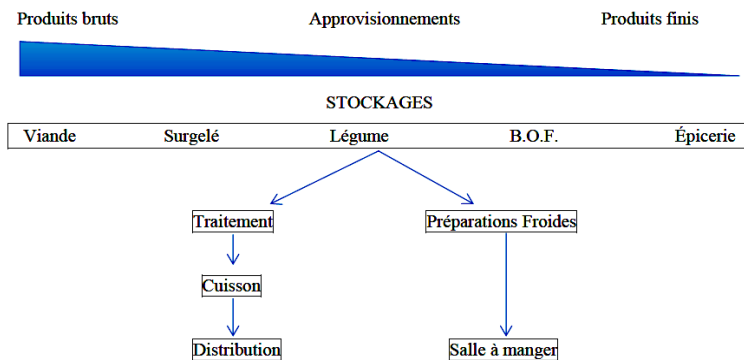


FIGURE 1.22 – Schéma général d'organisation d'une cuisine d'assemblage, source : Poulain and Larrose [1].

### 1.5.4 Concept de production

L'unité centrale de production alimentaire du CHT fonctionne selon le principe de la liaison froide (Figure 1.23). Dans ce mode de fonctionnement, la consommation est déconnectée, dans le temps et l'espace, de la fabrication des repas. Cette technique utilise comme moyen de liaison la réfrigération des repas, qui consiste après confection des plats, à abaisser leur température de  $+ 63^{\circ}\text{C}$  à  $+ 10^{\circ}\text{C}$  en moins de 2 heures, par l'intermédiaire des cellules de refroidissement. Ceci permet d'assurer une qualité sanitaire maximale lorsque les plats cuisinés sont livrés ou consommés plusieurs jours après leur fabrication. Les conditions de stockage, de remise en température et de conservation sont très précises dans l'ultime but d'assurer une qualité sanitaire irréprochable (Poulain and Larrose [1]).

La liaison froide a donc comme conséquence directe la mise en place d'un cycle de refroidissement effectué en aval de la cuisson, qui doit être mis en place en minimisant au maximum le temps d'attente des denrées alimentaires avant le traitement thermique. Ce dernier doit être couplé avec un respect scrupuleux de la chaîne du froid jusqu'à sa température. Ces étapes sont très importantes pour la stabilisation du produit alimentaire, d'un point de vue microbiologique.

Cette technologie offre une souplesse et une flexibilité pour la gestion des denrées alimentaires et des services, car elle permet de préparer les repas jusqu'à 3 jours avant leur consommation. Elle apporte des possibilités de fonctionnement que n'offrent pas d'autres systèmes, et permet de déconnecter les rythmes de production de ceux de consommation. L'avantage s'avère important en termes d'organisation et de productivité. En effet, la liaison froide permet d'augmenter la productivité par un lissage des charges de travail sur les matériels, qui ont alors une occupation maximale, tout en garantissant une bonne qualité organoleptique des produits fabriqués. Elle permet également d'allonger les dates limites de consommation des produits et de regrouper ainsi la production sur 5 jours par semaine au lieu de 7j/7 en liaison chaude. Ainsi, la durée de conservation des plats permet de proposer des menus à choix multiples ou d'assurer un service de restauration, quelles que soient les conditions de distances ou d'horaires. Sur le plan sanitaire, le froid est considéré comme le meilleur allié de la sécurité alimentaire et permet de stopper la prolifération bactérienne, à l'origine des intoxications alimentaires.

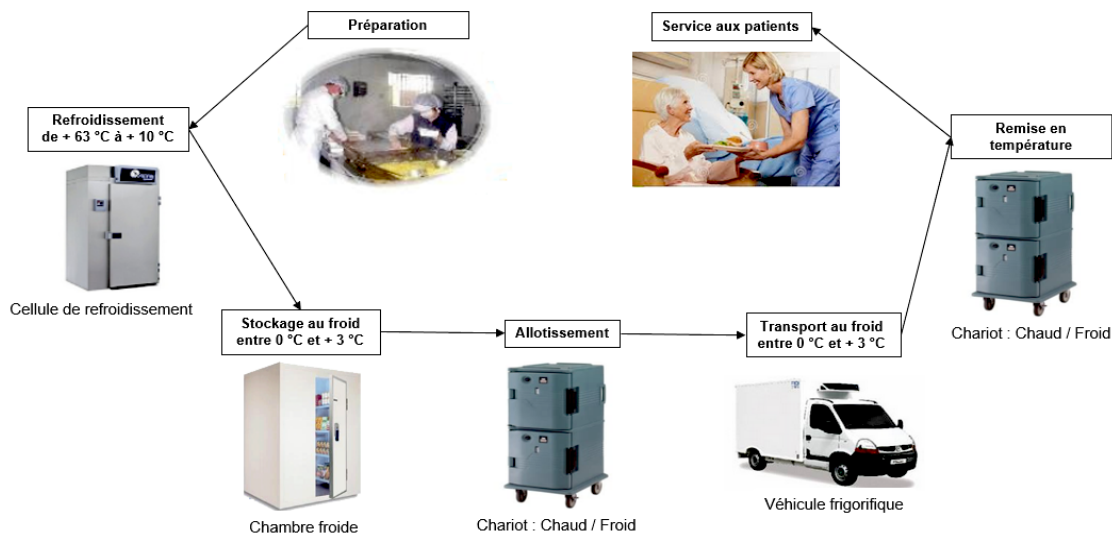


FIGURE 1.23 – Étapes du fonctionnement de la liaison froide.

### 1.5.5 Environnement technologique

L'environnement technologique permet de lier la production et la distribution. Il renvoie essentiellement à la notion de détermination des modes de conditionnement, de refroidissement, de remise ou de maintien en température et de transport, ainsi que les outils de gestion de production, de gestion financière et de traçabilité, etc.

Dans le processus de fabrication des repas, une fois que les plats sont produits, ils sont par la suite conditionnés et operculés à chaud à + 63°C puis refroidis dans les cellules de refroidissement, ou ils sont refroidis en bacs gastronormes GN dans les cellules, puis conditionnés et operculés à froid avant d'être acheminés en chambre froide des produits finis. Le choix du conditionnement à chaud ou à froid dépend de la nature du produit à conditionner et le client destinataire. Le conditionnement des plats dépend du client servi. En effet, il est effectué en général, en barquettes jetables individuelles mono-portions, en barquettes jetables collectives multi-portions, ou en bacs gastronormes multi-portions. La remise en température est effectuée dans les offices alimentaires au niveau des services médicaux au moyen des chariots de remise en température à air pulsé pour les plats chauds. Une fois que les productions du jour sont préparées, conditionnées et refroidies, celles-ci sont ensuite stockées dans la chambre froide des produits finis PCEA, où les agents répartissent dans des cagettes, les produits par repas pour les patients et l'ensemble des clients en fonction des prévisionnels. En ce qui concerne les patients, les plateaux de repas sont assemblés et acheminés dans des chariots isothermes, jusqu'aux offices correspondants, afin d'être remis en température puis distribués aux patients. Pour le restaurant du personnel, le mode de distribution est un self-service. En effet, les plateaux, les verres et les couverts sont mis à disposition du personnel à l'entrée du restaurant,

tandis que le pain et les fruits sont proposés juste avant la caisse. Le menu étant affiché en amont, le client peut ainsi se diriger là où il le souhaite. Les boissons sont disposées en premier, suivies des hors d'œuvres et des desserts en individuel. Des assaisonnements ainsi qu'une fontaine à eau sont disponibles au centre de la salle à manger. Concernant l'Internat, le mode de distribution est également un self-service. Les plats chauds sont en bacs gastronormes et les plats froids sont en barquettes plastiques collectives.

Plusieurs logiciels sont utilisés au sein de l'UCPA. Elle dispose tout d'abord d'un logiciel de Gestion de la Production Assistée par Ordinateur (GPAO), qui se divise en deux modules :

- **Prise de Commande Repas (PCOM)** : ce module est dédié à la prise de commandes des repas. Il est utilisé par le service de soin des hôpitaux et les différents clients pour la passation de commande.
- **Gestion de Production (GPROD)** : il permet de gérer les approvisionnements, les produits, le suivi des stocks, et il sert également à organiser la production, ajuster les quantités des plats, générer et éditer des fiches suiveuses.

Le service diététique paramètre les menus des patients dans la partie PCOM du logiciel, et le Responsable de la GPAO, paramètre quant à lui les menus des clients dans la partie GPROD. Ce logiciel est utilisé par le service diététique, par différents Responsables de l'UCPA et par les Responsables du Self et de l'Internat, etc. L'accès à cet logiciel dépend de la fonction des utilisateurs.

L'UCPA dispose également d'un logiciel de traçabilité et de gestion des stocks, qui permet d'effectuer la traçabilité des produits sur ordinateur, de la réception des matières à l'exportation des produits finis, en utilisant un marquage par code-barres, et l'assistance à la gestion de la production. Le système permet d'identifier les produits reçus, fabriqués et expédiés en sauvegardant leurs caractéristiques, de les marquer par étiquettes code-barres et de suivre leur parcours tout au long du process de fabrication (opérations subies, opérateurs intervenants, contrôles, etc). Le système permet également d'obtenir des rapports de traçabilité complets par lots de produits, par postes de travail, par matériels, etc, afin d'effectuer les contrôles quotidiens et les recherches en cas d'alerte sanitaire, comme exigé par la réglementation et défini dans le PMS. Le logiciel se répartit en deux secteurs de travail : réception et fabrication. Ces secteurs sont liés afin d'assurer la continuité de la traçabilité, de l'entrée à la sortie du site de production. De plus, un secteur expédition, ce qui permettra une traçabilité totale et homogène sur l'ensemble de la chaîne.

Enfin, l'UCPA possède un logiciel de gestion financière, qui assure toutes les fonctions classiques d'un progiciel de gestion économique et financière. Ce logiciel est utilisé par le Responsable des approvisionnements et par l'agent s'occupant des saisies de bons des livraison, des sorties et des inventaires sur le logiciel de gestion financière.

Une interface existe entre le logiciel GPAO et le logiciel de gestion des stocks, ce qui permet une synchronisation des données au niveau du suivi des stocks, mais aucune n'est faite avec le logiciel de gestion financière, comme le montre la Figure 1.24. Il est envisagé de créer une interface entre

le logiciel de traçabilité et le logiciel financier par la suite afin de faciliter l'échange des données, et ainsi éviter toutes les saisies concernant l'approvisionnement.

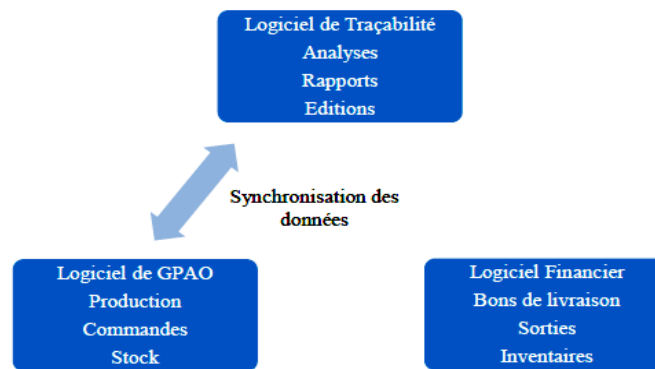


FIGURE 1.24 – Interactions entre les différents logiciels de l'UCPA.

Tel que décrit précédemment, l'UCPA dispose de plusieurs logiciels pour la gestion de production alimentaire. Néanmoins, il n'existe aucun logiciel permettant d'organiser la production alimentaire à la journée.

### Schéma général de fonctionnement de l'UCPA

Le schéma général du fonctionnement de l'UCPA, présenté en Annexe A.5, définit toutes les zones fonctionnelles et met en évidence la marche en avant. Toutes les étapes décrites précédemment sont détaillées, ce qui permet une meilleure compréhension du fonctionnement du système de restauration et de ses choix technologiques. L'Annexe A.2 présente un schéma de l'UCPA afin de visualiser l'organisation spatiale de chaque secteur décrit ci-dessus.

Après avoir défini le système de restauration du CHT, comprenant la typologie des produits matières premières, le concept de production, l'environnement technologique et le concept de distribution, nous allons nous pencher, par la suite sur le système organisationnel de fabrication des repas, afin de s'imprégner de l'organisation de la production et de mettre en évidence le lien entre les différents ateliers.

## 1.6 Le système organisationnel de production des repas

Avant d'entamer les détails du fonctionnement, nous présentons tout d'abord, dans la Figure 1.25, un schéma récapitulant le système organisationnel des étapes de production des repas, de l'approvisionnement des matières premières jusqu'à la distribution des repas aux clients, afin de présenter une vision globale du fonctionnement.

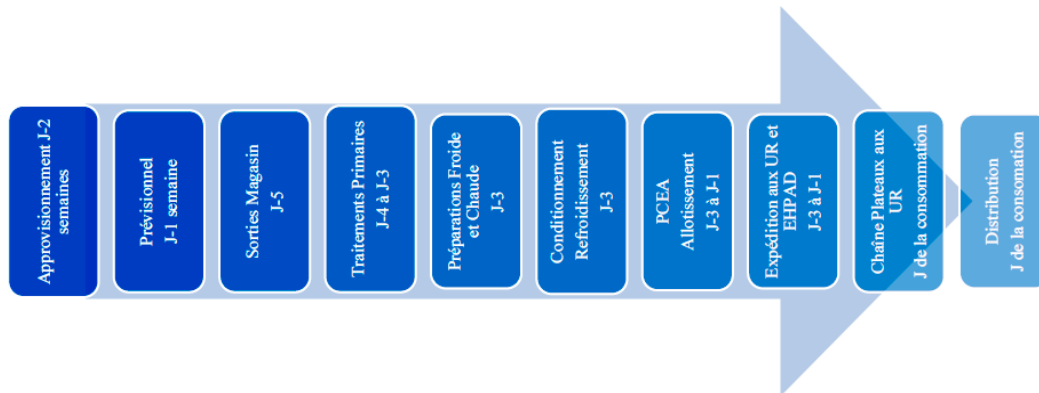


FIGURE 1.25 – Vision globale du système organisationnel de la production des repas.

### 1.6.1 Élaboration d'un plan alimentaire et des plans de menus

Le processus de prise de décisions pour la fabrication des repas (voir Annexe A.6) comprend 3 étapes : l'élaboration du plan alimentaire, la passation de commandes et l'élaboration du plan de production. Le plan alimentaire (voir Annexe A.7) est considéré comme le support de travail de la cuisine centrale. Celui-ci représente un outil préparatoire à la rédaction des menus, et sert de trame pour les réaliser en utilisant des termes génériques, et en respectant les fréquences d'apparition des plats, afin de satisfaire aux besoins nutritionnels et aux recommandations du GEMRCN et du PNNS pour chaque type de consommateur. Le plan alimentaire est élaboré sur trois semaines à l'avance par le service diététique, il définit le découpage des repas pour une semaine. Les menus sont établis du mardi au lundi, du fait d'un décalage entre le jour de production et de consommation. En effet, le lundi sont produits les menus du mardi et une partie du mercredi et ainsi de suite tout au long de la semaine. Les plans alimentaires sont définis sur deux saisons : le cycle saison d'hiver s'étale de la fin du mois de septembre à mi-juin, et celui d'été de mi-juin à la fin de septembre.

La création et l'élaboration d'un plan alimentaire et des plans de menus (voir Annexe A.8) s'établissent en plusieurs étapes. Tout d'abord, un plan de fréquence d'apparition des plats selon les grandes familles est effectué. En effet, chaque recette est classée dans une famille de : cuidité, charcuterie, féculents, légumes verts, viande cuisson courte, viande cuisson longue, etc. Pour chaque famille, afin de respecter les normes diététiques et nutritionnelles, un taux de renouvellement est accordé. Ensuite, un plan alimentaire est élaboré par la diététicienne sur trois semaines. L'étape suivante consiste à décomposer le plan alimentaire en différents menus, qui sont établis sur six semaines, afin d'offrir plus de variété aux patients d'Ehpad, tout en respectant le plan alimentaire. Une fois que le plan des menus est établi, la diététicienne l'adapte aux différentes typologies, en partant du menu "normal" et on le décline pour chaque régime : sans sel, diabétique, hypocalorique, hyposodé, mouliné, etc.

Comme l'UCPA du CHT produit des plats destinés aux patients avec des âges et des pathologies diverses, il existe de nombreux régimes alimentaires et textures. À titre d'exemples, on peut citer :

- le régime "normal" : alimentation équilibrée, avec assiette de légumes verts et de féculents en accompagnement.
- le régime "sans sel" : dans lequel le produit est assaisonné mais sans sel.
- le régime "sans graisses" : exclusion des graisses d'assaisonnement et des aliments gras.
- le régime "sans résidus strict" : exclusion de toute fibre végétale.
- le régime "hyper protidique – hyper calorique, enrichi en calcium" : 2500 kcal, 100 g de protéines, 1100 à 1200 mg de calcium/jour.
- les régimes "diabétiques grammés" : alimentation équilibrée, sans sucre ajouté, avec un féculent pesé cuit, un légume vert, un fruit et un pain individuel à chaque repas.
- le régime "moulinée" : crudité hachée, bouillon ou potage, viande, poisson, œuf haché et purée de légume, présenté en assiette séparée, laitage, compote, banane et pain de mie.
- la texture "mixée lisse" : plat complet mixé de texture lisse, laitage, compote, il peut se consommer à la cuillère.
- le régime "liquide" : plat complet mixé de texture lisse, yaourt, lait, jus de fruits, il peut se consommer à la paille.

Les déclinaisons par catégories de régime sont présentées dans la Figure 1.26 :

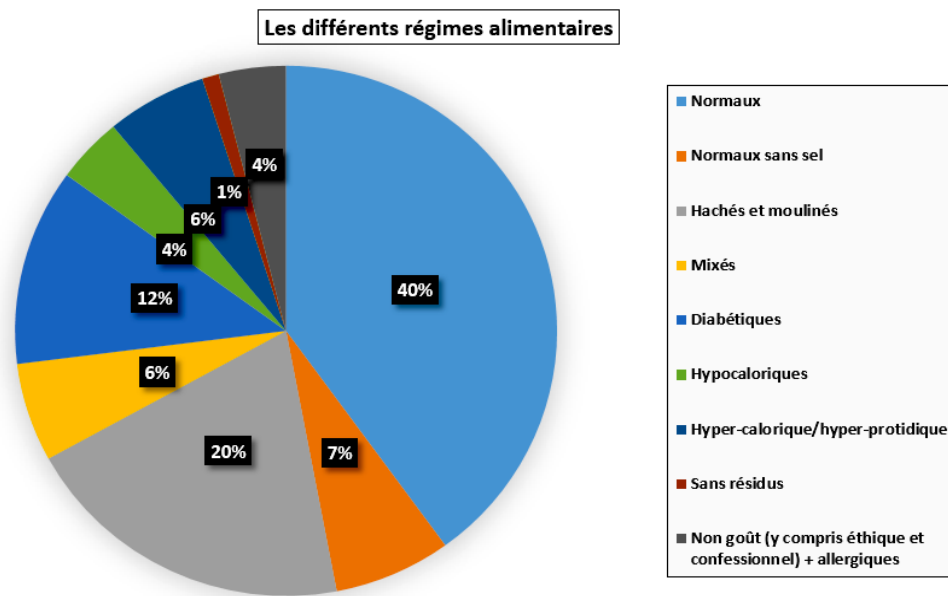


FIGURE 1.26 – Les déclinaisons des régimes alimentaires en pourcentage.

### 1.6.2 Création des plannings de production et des prévisionnels

Une fois que les plans alimentaires et les menus sont élaborés et validés, les fiches techniques ou suiveuses (voir Annexe A.9) sont créées à l'aide du logiciel Winrest GPAO, pour chaque plat et chaque

déclinaison. Puis, les menus sont retranscrits sur le GPAO avec les fiches techniques correspondantes et sont synchronisés sur le logiciel. Par la suite, le plan de conditionnement, présenté en Annexe A.12, permettant de planifier la production est généré. En général, ceci est réalisé trois semaines avant le jour de production. Ainsi, la synchronisation est effectuée et les plans de production (voir A.11) et les prévisionnels peuvent être établis.

Les commandes des repas pour les patients se font automatiquement par le logiciel GPAO, qui établit le prévisionnel de la production, en récupérant les chiffres du déjeuner et du dîner sur une date donnée. Seuls les jours qu'il souhaite avoir sont à renseigner. Quant aux clients du Self, Internat, Ehpad, etc, ils saisissent eux-mêmes leurs commandes de repas dans un délai de 7 jours avant la production.

Pour établir le prévisionnel de la production, le référent du logiciel GPAO se réfère aux historiques des années ou des cycles précédents, afin d'estimer la quantité approximative des repas à produire, dans la mesure où les menus se répètent tous les cycles de six semaines. Les plannings de production sont donc repris de cycle en cycle, en apportant d'éventuelles modifications sur la liste des plats demandés et leurs quantités.

Les Tables 1.5 et 1.6 présentent les plannings des jours de fabrication et de planification de la production :

Jour de production	Jour de consommation			
<b>Lundi</b>	Mardi déjeuner (J+1)	Mardi dîner (J+1)	Mercredi déjeuner (J+2)	Carte fixe et potage
<b>Mardi</b>	Mercredi dîner (J+1)	Jeudi déjeuner (J+2)	Jeudi dîner (J+2)	
<b>Mercredi</b>	Vendredi déjeuner (J+2)	Vendredi dîner (J+2)	Samedi déjeuner (J+3)	Carte fixe et potage
<b>Jeudi</b>	Samedi dîner (J+2)	Dimanche déjeuner (J+3)	Dimanche dîner (J+3)	
<b>Vendredi</b>	Lundi déjeuner (J+3)	Lundi dîner (J+3)	-	Carte fixe et potage

TABLE 1.5 – Jour de production pour jour de consommation des repas.

Jour de planification	Jour de consommation			
<b>Jeudi (J-4)</b>	Mardi déjeuner (J+1)	Mardi dîner (J+1)	Mercredi déjeuner (J+2)	Carte fixe et potage
<b>Vendredi (J-4)</b>	Mercredi dîner (J+1)	Jeudi déjeuner (J+2)	Jeudi dîner (J+2)	
<b>Lundi (J-2)</b>	Vendredi déjeuner (J+2)	Vendredi dîner (J+2)	Samedi déjeuner (J+3)	Carte fixe et potage
<b>Mardi (J-2)</b>	Samedi dîner (J+2)	Dimanche déjeuner (J+3)	Dimanche dîner (J+3)	
<b>Mercredi (J-2)</b>	Lundi déjeuner (J+3)	Lundi dîner (J+3)	-	Carte fixe et potage

TABLE 1.6 – Planning de planification de la production.

Le planning de production dans la Table 1.6 présente la planification actuelle de la production, en intégrant les moyens de consommation et les clients servis. L'évolution du processus de fabrication des repas avec le changement de mode de cuisson (cuisson de nuit basse température, pasteurisation, etc), ainsi que l'augmentation probable de la demande des repas doit amener à remettre en question la planification actuelle. Le développement d'un outil d'ordonnancement de la production permet en effet d'évaluer la faisabilité de cette planification à la journée.

### 1.6.3 Passation des commandes de matières premières

Les commandes des matières premières sont établies lorsque les menus et les fiches techniques correspondantes sont mis à disposition sur le logiciel GPAO. Les commandes sont passées en même temps et pour la même période concernant les patients et les différents clients, une semaine avant la mise en production, pour qu'elles soient saisies. Une fois que les commandes sont passées, les agents du magasin alimentaire établissent selon leur propre planning de livraison élaboré par typologie de produits (produits laitiers, viandes, surgelés, épicerie et fruits/légumes), une liste avec les informations suivantes : les produits souhaités, la quantité correspondante et le jour de livraison. La Table 1.7 présente le planning hebdomadaire de réception et de livraison des matières premières.

La phase de passation des commandes des matières premières nécessite une interface impérative entre le logiciel de gestion des stocks et le logiciel GPAO. En effet, les quantités déstockées, via le logiciel de gestion des stocks, doivent être transmises au logiciel GPAO qui gère les commandes au vu de l'état des stocks actuels. Les inventaires s'effectuent les lundis et mardis, ce qui permet de réaliser les commandes le mercredi, et ainsi être au plus juste dans les stocks, limiter les surplus et éviter les ruptures de stock.

Les commandes des matières premières regroupent les besoins de plusieurs recettes différentes. Cette étape est à l'heure actuelle encore très manuscrite et très peu automatisée, même si elle tend à s'informatiser du fait du déploiement d'un logiciel de gestion assistée par ordinateur.

Tableau des réceptions/livraison de 07h30 à 11h00				
Lundi	Mardi	Mercredi	Jedi	Vendredi
Surgelé F1	Surgelé F2	Surgelé F1	Surgelé F2	Surgelé F1
Fruits & légumes	Épicerie F2	Épicerie F1	Produits d'entretien barquettes/film	Fruits & légumes
Épicerie F1	Viandes cuites sous-vides charcuteries	Viandes fraîches	Fruits & légumes	BOF
Viandes fraîches	-	-	BOF	Viandes cuites sous-vides charcuteries

F1 : fournisseur 1, F2 : fournisseur 2

TABLE 1.7 – Planning de réception et livraison des matières premières sur 5 jours du lundi au vendredi.



#### 1.6.4 Passation des commandes de repas

À chaque admission informatique d'un patient hospitalisé dans un service, un plateau-repas est généré automatiquement. Le patient entrant aura comme profil alimentaire, soit : entrant pour la première hospitalisation correspond au profil alimentaire normal, ou profil alimentaire de la dernière hospitalisation. Les commandes des repas pour les patients se font par les aides-soignantes, par l'intermédiaire du logiciel GPAO. Le module PCOM du logiciel stocke les données administratives de chaque patient, ses spécificités avec le régime, la texture, les aversions etc, ce qui permet de respecter les goûts des patients, de gérer les différents régimes, mais aussi d'améliorer la communication entre les soignants et les patients. Cet élément offre aux patients du choix, tout en gérant les aversions alimentaires. Chaque jour, une aide-soignante propose au patient le menu du jour, qui est adapté à son profil alimentaire. La carte fixe, avec les produits constants, peut également être proposée si ce dernier le souhaite. Les cartes de plats fixes sont constituées de plusieurs plats de remplacement pour les différentes composantes du repas. Pour chaque composante, au moins un plat peut convenir aux textures modifiées (haché, mouliné, mixé, etc).

#### 1.6.5 Réception et circuits-courts

Une fois que les commandes sont passées pour la semaine, les livraisons se font dans les jours qui suivent. La veille de la réception, les bons de réception sont imprimés avec le bon de commande correspondant. Sur le bon de commande figurent tous les produits à réceptionner avec leurs propres codes-barres. Lors de la réception, la température du camion est relevée avec un thermomètre laser, les informations concernant la température du camion et son état de propreté sont entrées dans le logiciel. Ensuite un contrôle visuel est effectué, essentiellement d'un point de vue quantitatif, entre ce qui est inscrit sur le bon de commande et ce qui a été reçu. La conformité ou la non conformité, le cas échéant, est renseignée.

Une fois que les contrôles sont effectués, les produits sont répartis en fonction de leur destination. Ceci est effectué soit :

- dans des containers réfrigérés nominatifs. Une fois les containers répartis, ils sont stockés dans le SAS expédition à +3°C. Pour les produits surgelés, ils sont placés dans des containers réfrigérés et sont stockés dans une CF négative en attente d'être expédiés.
- sur des rolls qui sont ensuite stockés dans les chambres froides ou l'épicerie.

Un circuit dénommé "circuit-court" est mis en place afin d'éviter aux produits ne nécessitant pas de transformation, de circuler dans les locaux du process. Concernant les produits "circuit-court", la tâche de préparation se distingue en trois postes, celui qui s'occupe des desserts, des fruits & légumes et de la chambre froide BOF. Le principe de fonctionnement reste le même : chacun s'occupe de distribuer les différentes denrées pour tous les consommateurs (patients, Self, Internat, etc). Une liste prévisionnelle est éditée et réalisée environ trois jours avant la date d'export. Une copie du récapitulatif des quantités est positionnée sur une pile de bacs correspondante avant de la mettre

dans le SAS expédition. Lorsque le magasin alimentaire réceptionne la marchandise, il répartit les produits afin de séparer les produits entrants aux zones de production, à ceux du circuit-court, qui sont dispatchés et entreposés dans des containers.

### 1.6.6 Traitement primaire des produits

Une fois que les matières premières sont réceptionnées et stockées dans les chambres froides correspondantes ou l'épicerie, elles passent par l'atelier "pré-traitement". En règle générale, le pré-traitement des produits s'effectue la veille de la production. Le planning hebdomadaire de pré-traitement des matières premières est présenté dans la Table 1.8. L'atelier du pré-traitement comporte plusieurs étapes. Tout d'abord tous les produits sont acheminés sur rolls dans la zone de décartonnage/déballage afin de les séparer de leur dernier emballage fournisseur. Ici, les agents travaillent deux jours avant la production, ce qui permet de réagir dans le cas où il manque des quantités pour le jour de production. À partir de cette zone, il existe deux flux distincts :

- les boîtes, poches et seaux sont acheminés dans le SAS désinfection, où les emballages des produits passent dans un tunnel de désinfection avant d'être mis en cagettes.
- les fruits et légumes frais sont traités en légumerie directement le jour de la production.

Jour de prétraitement	Jour de consommation			
<b>Vendredi</b>	Mardi déjeuner (J+1)	Mardi dîner (J+1)	Mercredi déjeuner (J+2)	Carte fixe et potage
<b>Lundi</b>	Mercredi dîner (J+1)	Jeudi déjeuner (J+2)	Jeudi dîner (J+2)	
<b>Mardi</b>	Vendredi déjeuner (J+2)	Vendredi dîner (J+2)	Samedi déjeuner (J+3)	Carte fixe et potage
<b>Mercredi</b>	Samedi dîner (J+2)	Dimanche déjeuner (J+3)	Dimanche dîner (J+3)	
<b>Jeudi</b>	Lundi déjeuner (J+3)	Lundi dîner (J+3)	-	Carte fixe et potage

TABLE 1.8 – Planning de pré-traitement des matières premières.

Tous les produits transitent ensuite dans la chambre froide "produits pré-traités" avant d'être pris en charge par les différents ateliers (production chaude, préparation froide ou tranchage). Les produits nécessitant la mise en plaquage (les produits d'épicerie, les boîtes, la viande fraîche, les produits surgelés) transitent par le local déconditionnement/plaquage, où ils sont plaqués sur grilles ou en bacs gastronormes, selon le type de produit, et mis sur échelles de fours avant d'être stockés dans la chambre froide des "produits pré-traités", en attente d'être pris en charge par les différents ateliers, en fonction des plans de travail du jour de production.

Le plaquage des produits se fait de J-2 à J du jour de production : les agents plaquent les produits issus de l'épicerie à J-2, les produits surgelés (hors légumes) à J-1 et les légumes surgelés et la viande fraîche de J-1 à J. Cette organisation permet de gagner du temps le jour de la production. Deux

agents sont dédiés au poste de plaquage et ont en leur possession deux documents : un planning de production issu de GPAO, indiquant le produit à traiter et sa quantité en nombre de portions, et une fiche "sorties prévues des denrées" issue du logiciel de gestion de stock, indiquant la denrée à traiter avec sa quantité en kilos. La quantité à déconditionner est renseignée à la pièce pour certaines denrées, comme le poulet et le poisson, et au kilo pour d'autres comme pour les légumes. Chaque agent s'occupe de ses propres conversions entre la quantité inscrite sur les documents de travail et la quantité liée au conditionnement du fournisseur.

### 1.6.7 Préparation froide et production chaude

Après la phase du pré-traitement des matières premières, s'enchaîne l'étape de production. La production est scindée en quatre zones distinctes :

- la production chaude, où s'effectue la cuisson, l'assaisonnement, l'assemblage, le mixage et le conditionnement des plats chauds en fonction des plans de production et des fiches techniques.
- le refroidissement, où les plats sont refroidis après cuisson en utilisant des cellules de refroidissement.
- la production froide, où sont réalisés le découpage, le râpage, l'assaisonnement des produits servis froids, ainsi que le placage des produits en provenance du tranchage et l'assemblage des sauces avec le doseur automatique. Les produits sont mis en œuvre en fonction des plans de travail et des fiches techniques.
- le tranchage, où les produits en provenance de la chambre froide des produits prétraités et de l'atelier plaquage, sont tranchés et conditionnés en fonction des plans de fabrication et des fiches techniques. Les produits froids en texture hachée maison sont mis en œuvre en fonction des plans de travail et des fiches techniques. Les produits destinés à être operculés sont stockés couverts en chambre froide tampon en attente d'être operculés dans l'atelier de préparation froide.

Chaque zone dispose d'un plan de production indiquant les produits, les quantités à préparer pour la journée et le poids à conditionner, ainsi que les fiches techniques permettant la réalisation des recettes. Ces fiches suivent le produit de sa mise en place à son allotissement. Sur les fiches techniques apparaissent le bon d'économat, les différentes informations comme les programmes de four à appliquer, les points importants d'une recette, le rationnement des plats à respecter suivant les destinations, les indications sur le jour de consommation, les quantités de barquettes et leur modèle. Munis de ces fiches techniques, les agents ont toutes les informations pour mettre en place la production. Ainsi le jour de production, les cuisiniers récupèrent les denrées alimentaires préparées la veille ou le jour même de production accompagnées des fiches suiveuses et réalisent les plats demandés. Il convient de noter qu'il n'existe aucune fiche qui indique comment les tâches pour la préparation des plats sont ordonnancées. L'organisation de la production est effectuée selon les habitudes de travail et l'expérience des agents cuisiniers.

### 1.6.8 Conditionnement, refroidissement et stockage PCEA

Le conditionnement est effectué après la cuisson et la préparation des plats froids, par l'intermédiaire d'une ligne de conditionnement automatique équipée d'un système d'étiquetage à transfert thermique. En effet, les préparations froides sont conditionnées et operculées avant d'être acheminées en chambre froide des produits finis, attenante à l'atelier de préparations froides. Les préparations chaudes sont, soient conditionnées et operculées à chaud à  $+ 63^{\circ}\text{C}$  puis refroidies dans les cellules de refroidissement, soient refroidies puis conditionnées et operculées à froid ou à chaud avant d'être acheminées en chambre froide de stock des produits finis. Le choix du mode de conditionnement, dépend de la nature du produit à conditionner et le client destinataire.

Le nombre de barquettes à conditionner est indiqué sur le planning de production, mais le quantitatif réel peut être corrigé sur ce même planning, selon l'agent en poste. Les agents du conditionnement operculent le nombre de barquettes inscrites avec une marge de 2 à 3 barquettes, qui serviront pour les plats témoins. L'UCPA dispose de deux chaînes de conditionnement en production chaude et une chaîne de conditionnement en préparation froide. Les chaînes de conditionnement en production chaude sollicitent plusieurs acteurs :

- un ou deux agents, de part et d'autre de chaque chaîne de conditionnement, disposent les denrées alimentaires dans les barquettes. Le nombre d'agents nécessaires sur chaque chaîne dépend de la quantité du plat à conditionner. Les barquettes sont placées sur la chaîne de conditionnement pour être operculées et subissent un marquage indiquant le produit, le numéro de lot, la DLC, etc.
- un cuisinier qui réceptionne, au bout des chaînes de conditionnement, les barquettes operculées et étiquetées avant de les stocker en cagettes plastiques, et de les acheminer en chambre froide des produits finis ou en cellule de refroidissement selon le type de conditionnement.

Le refroidissement est une étape obligatoire lorsque le système de restauration est basé sur le principe de la liaison froide, puisque la réglementation stipule que le produit alimentaire, après avoir subi une cuisson, doit être refroidi de manière à atteindre une température de  $+ 63^{\circ}\text{C}$  à  $+ 10^{\circ}\text{C}$  en moins de deux heures. De ce fait, une fois que les plats sont cuits et conditionnés en barquettes, ils séjournent par la suite pendant une durée variable (selon ses caractéristiques intrinsèques) dans des cellules de refroidissement. Des piles de dix à onze cagettes installées sur socles rouleurs (voir Annexe A.16) investissent en doublette les cellules de refroidissement. Une fois les documents de traçabilité établis, les produits sont acheminés dans la chambre froide de produits finis PCEA. Cette chambre de stockage, réfrigérée à  $+ 3^{\circ}\text{C}$ , est le point de rencontre des plats sortants des zones de production froide et chaude.

Les agents travaillant en zone de stockage PCEA, fonctionnent selon le plan de production, à savoir si la production fabrique les repas de midi ou de soir. Deux agents travaillent dans le secteur de stock des produits finis et se répartissent les tâches en fonction des destinataires. Dans ce local, s'effectuent également la répartition dans des cagettes des produits par repas pour les patients et

les clients en fonction des prévisionnels et leurs acheminements dans le SAS expédition pour la livraison. Un listing prévisionnel est réalisé quatre à six jours avant la production. Cette zone de stock est divisée en espaces dédiés au repas de midi et de soir, pour chaque client, de manière à faciliter l'étape d'allotissement. La marchandise est ainsi préparée par rapport à la quantité inscrite, les denrées alimentaires sont ensuite livrées aux différents sites dans un local réfrigéré à + 3°C avec le listing prévisionnel et les quantités fournies par l'UCPA.

### 1.6.9 Allotissement et expédition

L'allotissement se définit comme étant une opération consistant à organiser et répartir les plateaux de repas selon leur destination, de façon à faciliter leur manutention et leur enlèvement. L'allotissement est effectué dans un local attenant à celui des produits finis et celui du quai d'expédition (voir Annexe A.16). Cette phase du process commence suite à la répartition des plateaux de repas par destinataire. Ces derniers sont envoyés par la suite, en SAS expédition où ils sont pris en charge par les agents. Une fiche récapitulant les patients par service est éditée afin d'effectuer un contrôle en fin de la chaîne. Après avoir imprimé ces fiches, une "carte-plateau" est éditée pour chaque patient, en prenant en compte ses interdits suivant sa pathologie et ses aversions. Les listes des préparations froides et chaudes ainsi que celles des produits de circuit-court sont constituées par les chiffres réels prélevés sur le logiciel GPAO. Avant la mise en plateau, les repas sont mis à disposition par le PCEA et sont ajustés avant le début de la mise en route de la chaîne d'allotissement. L'organisation de la chaîne d'allotissement se déroule de la manière suivante :

- agent n°1 : au début de la chaîne, il dispose le plateau de repas, le pain et la carte de patient.
- agent n°2 : à gauche du sens du tapis d'avancement, il dispose la viande et les légumes.
- agent n°3 : à droite du sens du tapis d'avancement, il dispose les hors d'œuvres et le fromage.
- agent n°4 : à droite du sens du tapis d'avancement, il dispose les desserts et les fruits.
- agent n°5 : au bout de la chaîne, le chef d'équipe fait un contrôle visuel du plateau et enfourne dans le chariot.

## 1.7 Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons présenté l'environnement industriel dans lequel se sont réalisés nos travaux de recherche. Nous avons abordé les différents enjeux du milieu hospitalier en France, et les travaux qui déterminent la proportion des coûts et des dépenses liés à la logistique en milieu hospitalier. Nous avons présenté les différents établissements de santé, dont la réorganisation des flux alimentaires a été au cœur des travaux menés dans cette étude. Par la suite, l'accent a été mis sur le contexte et les problématiques visés dans le cadre de ce projet de recherche. La naissance de ce projet de thèse est arrivée suite à la collaboration du CHT et le laboratoire LIST3N de l'UTT, dans le but de développer des méthodes d'optimisations permettant de contribuer à améliorer les activités du service de restauration et le bien-être au travail des employés. L'enjeu est de mieux

organiser les processus de production alimentaire à travers des outils d'aide à la décision. Ensuite, nous avons présenté le service de restauration et l'unité centrale de production alimentaire du Centre Hospitalier de Troyes, ainsi que son système organisationnel permettant la production des repas. Ceci nous a permis de mieux appréhender et comprendre les différentes étapes du fonctionnement des processus de production alimentaire, et de mettre en évidence la particularité et la multitude des contraintes liées à la restauration hospitalière, qui nécessite une organisation particulièrement exigeante. Le prochain chapitre est consacré à la présentation d'un état de l'art sur les travaux existants traitant des problématiques voisines à celles étudiées dans cette thèse.



## Chapitre 2

# État de l'art

### 2.1 Introduction

La diffusion du paradigme de l'industrie 4.0 a introduit un nombre croissant d'innovations technologiques dans les entreprises pour améliorer les processus de production et logistiques, en particulier, les technologies numériques, telles que l'Internet des objets, les technologies du cloud et l'intelligence artificielle, qui ont favorisé l'évolution et l'amélioration de ces processus vers une plus grande performance et flexibilité (Maslarić et al. [32]). Aujourd'hui, le terme logistique 4.0 est couramment utilisé pour décrire cette évolution, ancrée dans l'amélioration incrémentale des environnements et des processus logistiques pour intégrer les nouvelles technologies numériques (Müller [33]). Comme la technologie favorise les processus tant physiques que cognitifs (i.e. de la manutention et du stock des matériaux à l'échange d'informations et la prise de décision (Timm and Lorig [34])), ses impacts peuvent être observés à différents niveaux, de la configuration des ressources d'infrastructure physique à la gestion des flux logistiques et la planification des ressources (Barreto et al. [35]). La technologie est ainsi souvent utilisée pour automatiser les processus afin d'atteindre des niveaux d'efficacité et de performance plus élevés.

Malgré la forte tendance à l'automatisation des systèmes de production et logistiques, la présence humaine restera néanmoins pertinente dans de multiples activités et ne peut pas être remplacée par la technologie (Jäger and Ranz [36], Mital and Pennathur [37]). Cependant, les facteurs humains qui englobent tous les aspects physiques, psychologiques et sociaux de l'être humain, sont parmi les nombreux problèmes, qui affectent traditionnellement la logistique (comme le manque de coordination et de communication entre les acteurs de la chaîne d'approvisionnement, les erreurs de gestion des entrepôts, l'augmentation des fréquences de livraison et les attentes plus exigeantes des clients (Strandhagen et al. [38])). Ces derniers sont considérés comme des incertitudes et des éléments de complexité les plus importants perçus par les logisticiens dans les processus industriels (Nilsson [39], Strandhagen et al. [38]). En particulier, il est possible que la complexité de la logistique soit due principalement au comportement humain qui conditionne la prise de décision rationnelle, les organisations, les hiérarchies, les émotions et les caractéristiques personnelles (Bruzzone et al. [40]).



Étant donné le rôle crucial de la logistique dans les performances des entreprises manufacturières, il est primordial d'envisager la transformation des processus logistiques de manière globale, tout en favorisant les changements opérationnels et humains parallèlement aux progrès technologiques. Ainsi, lors d'une transition vers l'industrie 4.0, il est indispensable de prendre en considération toutes les dimensions des facteurs humains qui affectent considérablement la performance des systèmes de production et logistiques.

Ce chapitre présente une étude bibliographique sur les différents sujets traités dans cette thèse. Dans un premier temps, l'accent est mis sur l'importance du facteur humain dans les systèmes de production et logistiques. Un état de l'art sur les approches de modélisation et de résolution utilisées dans la littérature pour la conception des systèmes de production et logistiques intégrant des aspects humains, ainsi que la méthodologie de recherche sont présentés. Ensuite, une étude bibliographique sur les problèmes de planification et d'ordonnancement des processus de production alimentaire et les méthodes de résolutions développées dans des travaux de recherche antérieurs, sont présentées. La dernière partie de ce chapitre est consacrée à la présentation d'un état de l'art sur les problèmes job-shop flexible. De plus, pour une meilleure compréhension du modèle mathématique développé dans cette thèse, les formulations mathématiques précédemment proposées dans la littérature pour les problèmes job-shop flexible et job-shop flexible avec setups séquence-dépendants sont passées en revue. À la fin de ce chapitre, une revue de littérature sur les schémas de codage et de représentation des solutions pour ces différents problèmes est présentée.

## 2.2 Les facteurs humains dans les systèmes de production et logistiques

Les processus opérationnels de production et de logistique sont des éléments importants pour le service du client et ils représentent un avantage concurrentiel dans de nombreux secteurs d'activité. C'est pourquoi, la gestion des processus de production et de logistique suscite l'attention des chercheurs depuis de nombreuses années. Les processus opérationnels sont généralement caractérisés par une quantité importante de travail manuel, en particulier dans des domaines tels que la maintenance et l'assemblage. Malgré les possibilités qu'offre l'automatisation des systèmes de production et logistiques, de nombreuses entreprises continuent de faire appel au travail humain dans plusieurs domaines, en raison de sa flexibilité et de ses capacités cognitives et motrices que les machines ne peuvent pas encore imiter de manière économique. Compte tenu de l'impact important que ces processus peuvent avoir sur le coût total d'une entreprise, les recherches antérieures dans ce domaine se sont focalisées sur le développement des modèles mathématiques de planification permettant d'aider les gestionnaires pour trouver des solutions aux problèmes de décision tout en réduisant les coûts (voir, De Koster et al. [41]).

Néanmoins, la plupart des modèles de planification proposés ont ignoré les caractéristiques spécifiques des travailleurs humains. Cela peut conduire souvent à des résultats de planification irréalisables ou à des horaires de travail insatisfaisants, voire nuisibles pour les employés (Grosse et al. [42], Grosse et al. [43]). Afin de garantir la productivité et l'efficacité des systèmes et pour s'assurer que les modèles de planification reflètent autant que possible la réalité, il est indispensable de prendre en compte les facteurs humains dans la conception des systèmes de production et logistiques, afin de créer des lieux de travail fiables, efficaces et sûrs (Battini et al. [44], Battini et al. [45]). Même si des recherches récentes ont commencé à intégrer des aspects humains dans les modèles mathématiques de planification de la production et de la logistique, par exemple en modélisant les effets d'apprentissage (Givi et al. [46], Grosse and Glock [47]) ou les dépenses énergétiques humaines (Battini et al. [48], Calzavara et al. [49], Finco et al. [50]), il semble y avoir encore un manque important et mis en évidence, concernant le développement des modèles de planification tenant compte de l'interaction entre l'humain et les systèmes de production et logistiques.

## 2.3 Modélisation des facteurs humains dans les systèmes de production et logistiques

Un groupe de travail WG7<sup>1</sup> nommé "facteurs humains et ergonomie dans la conception et la gestion des systèmes industriels et logistiques" a été créé en 2015. Ce groupe de travail vise à étudier le développement des approches innovantes pour l'intégration des facteurs humains dans la conception des systèmes de production et logistiques du futur. Il se focalise également sur le développement des outils d'aide à la décision dans les systèmes de fabrication et les chaînes d'approvisionnement à l'ère de l'industrie 4.0, en combinant la recherche opérationnelle, le génie industriel, et la science des données. Dans l'optique du WG7, les modèles existants d'aide à la décision, d'optimisation et de simulation, sont axés sur la conception et la gestion des systèmes. Dernièrement, l'accent a été mis particulièrement sur le développement des modèles basés sur l'industrie 4.0 pour rendre les systèmes de production et logistiques plus intelligents, plus durables et plus résistants (par exemple, Ivanov et al. [51]). La contribution du WG7 vise à introduire et à promouvoir des approches axées sur l'homme, sur la base des contextes typiques de l'ingénierie industrielle. La Figure 2.1 présente la perspective du WG7 pour le développement des outils d'aide à la décision pour les systèmes de production et logistiques du futur (Panetto et al. [2]).

---

1. Working Group 7 of the IFAC Technical Committee (TC) 5.2 "Manufacturing Modelling for Management and Control".

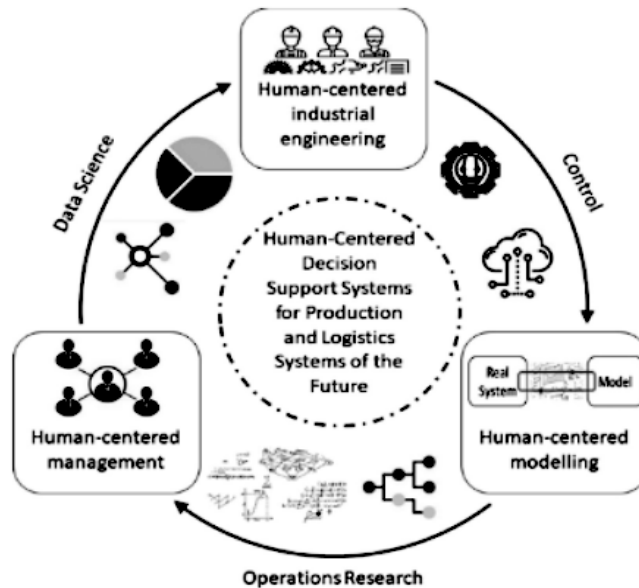


FIGURE 2.1 – Perspective du WG7 pour la modélisation des systèmes de production et logistiques du futur (adapté de Panetto et al. [2]).

Le facteur humain doit être pris en considération dans la phase de conception des systèmes de production et logistiques, en renforçant les approches traditionnelles pour permettre la conception des lieux de travail plus adaptés. Il doit être considéré comme une dimension importante et une exigence obligatoire, permettant d'améliorer la productivité et la performance des systèmes, ainsi que les conditions de travail et le bien-être des employés. Récemment, avec le développement des technologies de l'industrie 4.0, les méthodes et les outils de conception des systèmes ont commencé à évoluer, tout en prenant en compte des aspects humains et des contraintes ergonomiques. Les nouvelles technologies permettent la collecte d'une grande quantité de données, qui peuvent être utilisées pour améliorer la connaissance du système étudié. Les modèles basés sur les données doivent inclure des facteurs humains (tels que la fatigue, la charge de travail, la personnalité, le vieillissement, etc.), reliant la santé des employés à la productivité et la performance des systèmes. En outre, ils doivent également tenir compte de l'utilisation des technologies de l'industrie 4.0 et de leur impact sur les utilisateurs (Calzavara et al. [52]).

Grâce à l'application des techniques avancées de la recherche opérationnelle, les modèles peuvent être élargis et appliqués au niveau de la gestion pour trouver les meilleures pratiques et les implications managériales sur la manière de gérer les ressources humaines, de supporter les employés avec de nouvelles technologies, et de planifier et contrôler les systèmes de production et logistiques. L'utilisation des techniques de science des données peut fournir un retour d'information au génie industriel, par exemple en indiquant les facteurs les plus importants, en prédisant le comportement des systèmes et en suggérant ainsi comment optimiser la conception afin de disposer des systèmes de production et logistiques adaptatifs et intelligents.

Concernant les contributions existantes portant sur ce sujet, selon Sgarbossa et al. [53], il a été constaté au cours des dernières années, une tendance pour l'intégration des facteurs humains dans les modèles de fabrication pour la gestion et le contrôle, et en particulier pour la conception des systèmes de production et logistiques. La Figure 2.2 présente une synthèse sur les études réalisées dans la littérature portant sur l'intégration des facteurs humains dans les systèmes de production et logistiques. À partir de cette figure, on constate que la majorité des travaux de recherche sont fortement axés sur le développement des modèles mathématiques/analytiques tenant compte des facteurs humains et des méthodes de résolution associées. Les autres techniques, telles que les modèles de simulation, etc., sont rarement étudiés.

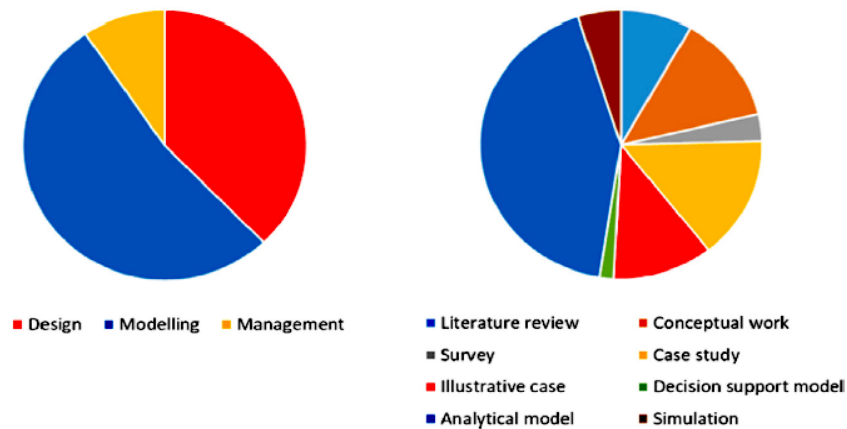


FIGURE 2.2 – Études réalisées sur les facteurs humains dans les systèmes de production et logistiques.

La Figure 2.3 présente les thèmes des travaux de recherche étudiés dans la littérature. D'après cette figure, on remarque qu'un grand intérêt a été observé récemment, sur la conception et la gestion des lignes de production et d'assemblage (P&AM). Par la suite, l'intralogistique et la gestion des entrepôts (I&W). Seuls quelques travaux ont été portés sur la gestion des stocks et le dimensionnement des lots (IM&LS) et un fort intérêt a été constaté dernièrement sur le facteur humain dans le contexte de l'industrie 4.0.

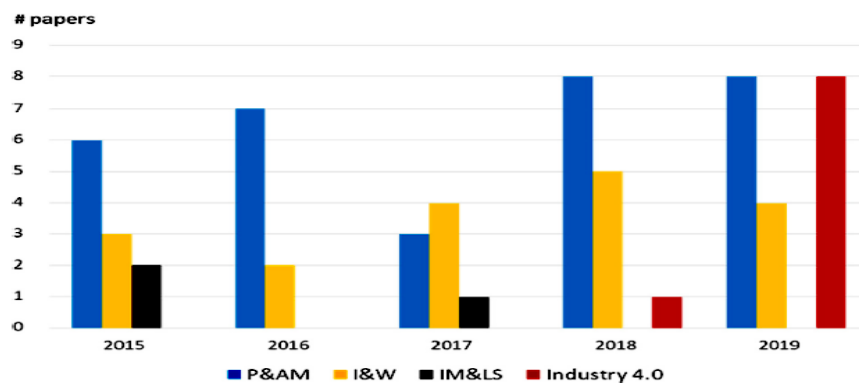


FIGURE 2.3 – Thèmes des travaux de recherche plus récentes.

La Figure 2.4 illustre les aspects des facteurs humains qui ont été pris en compte dans les travaux de recherche de la littérature. Cette figure montre qu'un intérêt important a été porté sur des facteurs physiques tels que : la dépense énergétique et la fatigue, qui ont été considérées comme des contraintes dans les modèles. À l'opposé, moins de travaux se sont focalisés sur des aspects perceptifs, mentaux ou psychosociaux. La Figure 2.5 présente les objectifs de ces travaux de recherche, et elle indique que la majorité de ces travaux portent sur l'amélioration des performances des systèmes et du bien-être des employés, tandis que peu de travaux ont considéré l'amélioration de la qualité des systèmes.

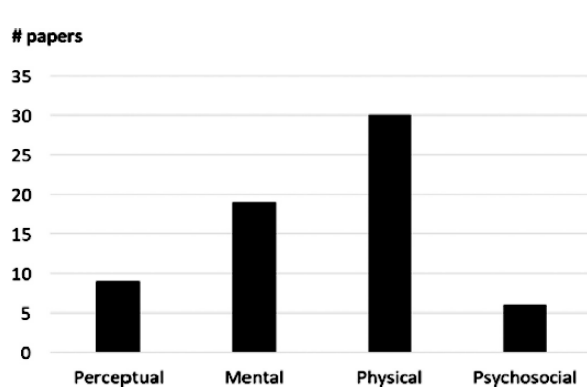


FIGURE 2.4 – Aspects des facteurs humains considérés dans les travaux de la littérature.

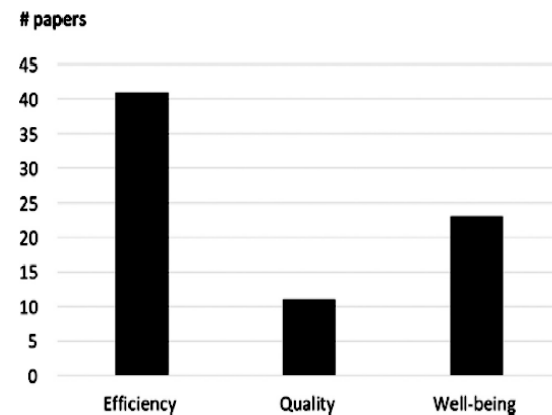


FIGURE 2.5 – Objectifs des travaux de la littérature.

## 2.4 Aperçu de revue de littérature

Afin d'appréhender l'état de l'art concernant la prise en compte des facteurs humains dans le contexte industriel, une recherche bibliographique a été effectuée. Le but est de comprendre comment les facteurs humains sont pris en considération dans les travaux existants dans la littérature, et comment ils sont intégrés pour la modélisation et l'optimisation des systèmes de production et logistiques.

La recherche bibliographique a été effectuée en utilisant des sites de recherche scientifique et également la base de données Scopus. Tous les articles qui ont été téléchargés dans cette base de données depuis sa création jusqu'à l'année 2021 ont été recherchés. La base de données Scopus est utilisée, vu qu'elle est reconnue comme une base de données réputée, et qu'elle comprend un plus grand nombre de revues que d'autres bases de données (par exemple PubMed, Web of Science). De plus, son analyse des citations est plus rapide et comprend plus d'articles que les autres bases de données (Falagas et al. [54]).

La Figure 2.6 présente la répartition des travaux de recherche portant sur le facteur humain dans les systèmes de production et logistiques entre 1992 et 2020, qui ont été trouvés dans la base de données Scopus. À partir de cette figure, on peut observer que le nombre d'articles pertinents portant sur ce sujet a connu une tendance à la hausse ces dernières années, ce qui indique que l'importance et l'intérêt pour ce thème de recherche n'ont émergé que récemment.

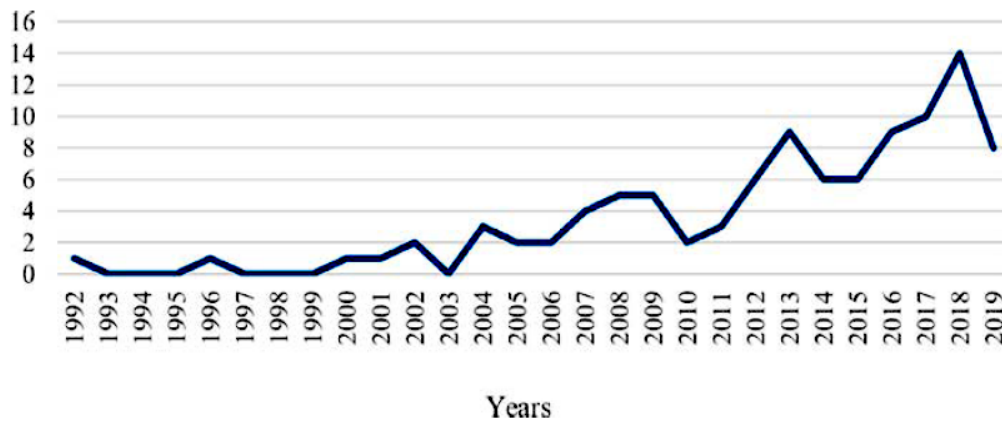


FIGURE 2.6 – Répartition des travaux de recherche par année de publication.

Des mots-clés principaux ont été utilisés pour les titres et les résumés des articles afin d'identifier les études qui visent la prise en compte des facteurs humains et qui sont menées dans un contexte de production et logistique. Pour définir cet ensemble de mots-clés, des catégories ont été d'abord définies en fonction de la conception et la modélisation des systèmes : (1) équilibrage et conception des lignes de production, (2) affectation tâches/opérateurs ; (3) rotation des tâches/changement des tâches et (4) conception et aménagement des espaces de travail.

Le logiciel VOSviewer<sup>2</sup>, qui est un outil permettant d'analyser des réseaux bibliographiques, a été utilisé pour étudier le réseau des mots-clés en appliquant la méthode de clustering VOS (Eck and Waltman [55]). L'utilisation de ce logiciel a pour but de visualiser les évolutions suivantes : (1) comment l'attention portée au facteur humain a évolué au fil des années, tel que montré sur la Figure 2.7 ; (2) comment les mots-clés choisis et ceux des articles trouvés, sont reliés entre eux dans les études précédentes, comme le montre la Figure 2.8.

2. <https://www.vosviewer.com/>



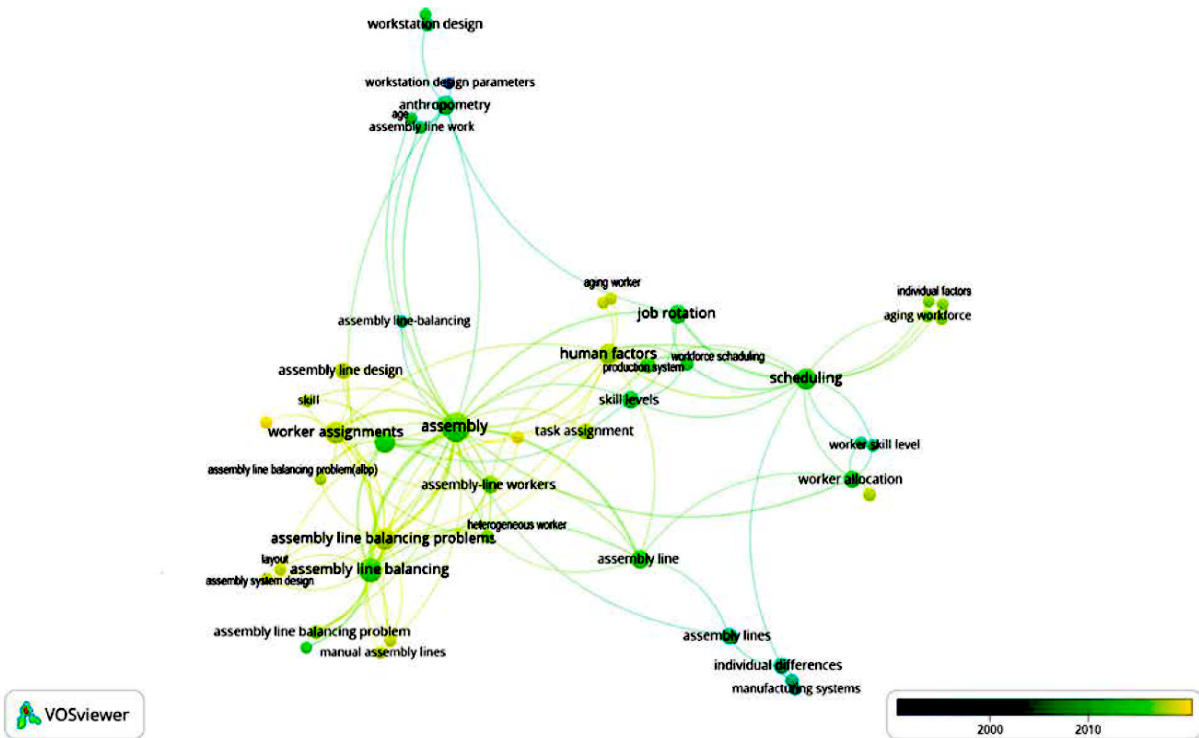


FIGURE 2.7 – Co-occurrence des mots-clés utilisés dans les recherches en fonction de l’année de publication.

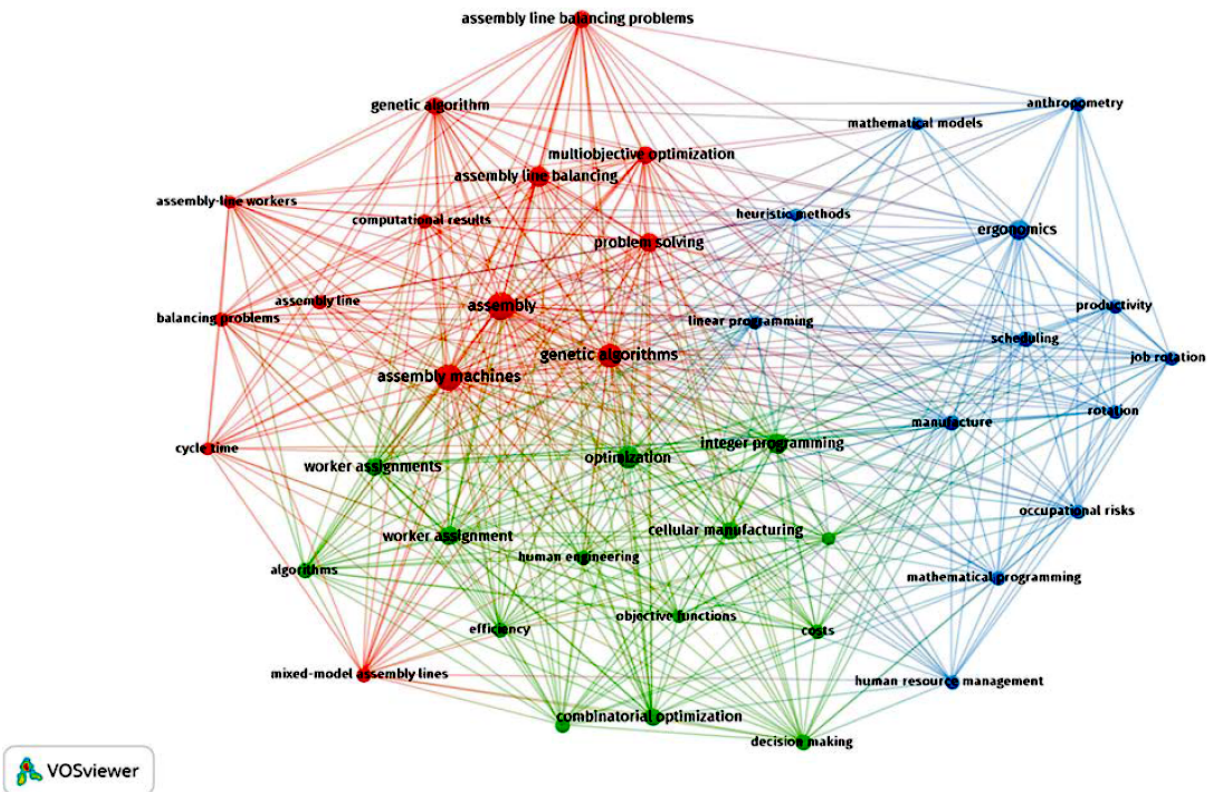


FIGURE 2.8 – Réseau des mots-clés de co-occurrence dans des études précédentes.

Dans la Figure 2.7, la co-occurrence des mots-clés est limitée aux mots-clés choisis pour la recherche dans la base de données Scopus et ceux utilisés dans les articles trouvés, afin de comprendre comment les ensembles des mots-clés sont reliés entre eux dans ces articles. La cartographie obtenue a été visualisée en fonction de l'année de publication afin de montrer comment l'intérêt pour les différents sujets connexes a évolué. Ici, on peut voir que la plupart des premières publications sont liées aux lignes d'assemblage et aux systèmes de production, tandis que la plupart des publications récentes se focalisent sur les problèmes des lignes d'assemblage, l'équilibrage des lignes d'assemblage et de production et l'affectation des opérateurs. De nouveaux mots-clés sont apparus avec ceux initialement définis. Ces derniers se réfèrent à des facteurs individuels tels que les compétences, l'âge, le sexe et les mesures anthropométriques, qui ont un impact important sur la performance des systèmes et qui sont pris en compte dans la plupart des études récentes (Gräßler et al. [56], Chen et al. [57], Kim et al. [58], Gong et al. [59], Liu and Yang [60], Moussavi et al. [61], Calzavara et al. [52], Digiesi et al. [62], Efe et al. [63], Messing et al. [64], Hirsch et al. [65], Lee et al. [66], Finco et al. [67], Dalle Mura and Dini [68]) portant sur l'intégration des facteurs humains dans les approches de modélisation et d'optimisation des systèmes de production.

L'importance des mots-clés sélectionnés et la façon dont ils sont reliés entre eux sont illustrées dans la Figure 2.8. Pour analyser la co-occurrence de tous les mots-clés des articles sélectionnés et afin de déterminer leur importance, chaque mot-clé est représenté par un nœud, et chaque relation entre les mots-clés est représentée par une arête. Pour déterminer l'importance de chaque mot-clé, la taille de chaque nœud a été rendue proportionnelle au nombre de ses occurrences dans le graphe. Le nombre minimum d'occurrences d'un mot-clé a été fixé à cinq. Selon la Figure 2.8 et en approfondissant l'analyse du graphe, trois clusters principaux ont été identifiés. Dans le premier cluster (en rouge), les mots-clés portent sur les problèmes des lignes d'assemblage. Le deuxième cluster (en vert) comprend les mots-clés axés sur l'affectation des opérateurs, et dans le dernier cluster (en bleu) les mots-clés se focalisent sur la rotation des tâches.

Sur la base des graphes présentés précédemment et selon la classification de la littérature, on peut conclure que les contributions scientifiques existantes, ont été particulièrement menées dans le contexte d'équilibrage des chaînes d'assemblage et de production, de l'affectation des opérateurs et de la rotation des tâches. Dans ce qui suit, un état de l'art est fourni sur ces différents sujets de recherche.

### 2.4.1 Planification et affectation des ressources humaines

Au cours des dernières années, diverses études ont été menées sur les problèmes d'ordonnement des ressources humaines. Gunes [69] définit ce dernier comme étant le problème d'affectation optimale des ressources humaines disponibles aux besoins d'une entreprise. Plusieurs travaux ont été réalisés dans la littérature traitant ce type de problème en prenant compte des facteurs humains. Alfares [70] a proposé une allocation optimale des tâches de manière à minimiser le nombre d'opérateurs et en tenant compte des jours de travail et des jours de repos successifs. Le coût total de



la main-d'œuvre est un autre objectif visé dans des travaux de recherche publiés par Elshafei and Alfares [71]. Seçkiner and Kurt [72] et Michalos et al. [73] ont proposé des approches de résolution pour l'ordonnancement des ressources humaines. Leurs travaux de recherche visent à minimiser la charge de travail des tâches affectées aux opérateurs et à équilibrer la charge de travail dans une chaîne de montage automobile.

Les caractéristiques personnelles des employés sont aussi des aspects importants pour l'évaluation du facteur humain. Costa and Miralles [74] ont proposé une métrique pour évaluer l'efficacité de la planification des tâches dans le cas des travailleurs handicapés. Leur objectif était de minimiser le nombre de tâches différentes effectuées par chaque employé. Othman et al. [75] ont développé un modèle en nombres mixtes multi-objectifs pour l'ordonnancement des ressources humaines, en tenant compte des facteurs humains et des différences entre les employés, telles que les compétences, la fatigue et les personnalités. L'objectif de leur étude vise la productivité et des aspects économiques. Par la suite, Moreira and Costa [76] ont publié un article sur le problème de planification des ressources humaines, en accordant une attention particulière à la personnalité, aux caractéristiques corporelles et mentales des employés. Ils ont proposé un algorithme hybride pour sélectionner les horaires de travail appropriés à partir d'un ensemble de solutions pour chaque période de temps. Leur objectif consiste à répartir la charge de travail entre les employés hétérogènes.

Dans les études mentionnées ci-dessus, les chercheurs n'ont pas abordé directement l'aspect ergonomique dans leurs problèmes d'affectation des ressources humaines. Alors qu'au cours des dernières années, de nombreux travaux ont été publiés sur l'ordonnancement de la main-d'œuvre avec des considérations ergonomiques comme enjeux principaux. Rattanamanee and Nanthavanij [77] ont proposé une approche ergonomique pour l'affectation des tâches aux opérateurs dans un système de production. L'aspect ergonomique a été représenté comme un risque quotidien causé par le travail dans différents postes. L'objectif est de minimiser le nombre d'employés sur une période de planification, de sorte que le risque quotidien ne dépasse pas une limite admissible pour chaque opérateur. Les risques ergonomiques ont été ciblés dans un autre article publié par Otto and Scholl [78]. Un modèle a été présenté pour équilibrer les risques ergonomiques entre les travailleurs, en utilisant la planification de rotation des tâches. Une évaluation globale des risques affrontés dans chaque poste de travail et les risques liés aux différentes tâches d'une ligne de production, a été réalisée. Dans ces études, la différence entre les caractéristiques personnelles des employés, n'est pas prise en compte.

Très peu de recherches ont pris en compte l'aspect ergonomique des tâches, ainsi que les caractéristiques et les capacités personnelles de chaque opérateur, dans la planification des ressources humaines. Par exemple, Azizi et al. [79] ont présenté un modèle dynamique pour l'affectation des opérateurs, en intégrant la rotation des tâches. Dans leur modèle, la rotation des tâches a un impact négatif sur l'efficacité des opérateurs en raison du manque de compétences pour le travail sur différents postes de travail. Néanmoins, elle a un effet positif grâce à l'augmentation du niveau de motivation. Leur principal objectif est de déterminer l'intervalle optimal de rotation des tâches, tout en tenant compte des facteurs personnels et mentaux des opérateurs. Dans une autre recherche

développée par Huang and Pan [80], l'anthropométrie, qui est un facteur physique dans le domaine de l'ergonomie, est prise en compte dans leur approche de planification des ressources humaines. Leurs objectifs visent à réduire le risque moyen et à diminuer le nombre d'opérateurs exposés à un niveau de risque élevé. Ils ont effectué une évaluation de risque en fonction de la différence entre l'anthropométrie de l'opérateur et les exigences requises pour le poste de travail sur lequel il est affecté. En outre, Van den Bergh et al. [81] ont effectué une revue exhaustive de la littérature sur l'ordonnement des ressources humaines. Dans cette revue, les travaux de la littérature sont classés en fonction de leurs objectifs, contraintes, hypothèses et applications.

### 2.4.2 Équilibrage des chaînes d'assemblage et de production

L'équilibrage des lignes d'assemblage et de production et ses difficultés connexes sont des problèmes d'optimisation bien connus dans les systèmes manufacturiers. Selon Guschinskaya and Dolgui [82] ce problème consiste à répartir les opérations nécessaires pour la fabrication des produits à des postes de travail d'une ou de plusieurs lignes tout en respectant un ensemble de contraintes technologiques, économiques ou autres. Les facteurs humains, les risques ergonomiques, la productivité et l'optimisation multicritère ont été largement pris en compte au cours des dernières années dans les travaux traitant ce problème. Battini et al. [83] ont présenté une nouvelle extension du problème d'équilibrage des lignes de production et ils ont proposé un modèle en nombres mixtes, en considérant des facteurs ergonomiques. L'objectif est de réduire la fatigue des opérateurs. Moussavi et al. [84] et Moussavi et al. [85] ont proposé une nouvelle extension du problème intégrant l'affectation des opérateurs et la rotation des tâches, et ils ont développé une heuristique hybride pour résoudre le problème étudié. Sgarbossa et al. [86] ont proposé une approche de programmation multi-objectifs intégrant des critères ergonomiques pour le problème d'équilibrage d'une ligne d'assemblage. Outre les critères ergonomiques, la dépense énergétique a été également étudiée dans leurs travaux. Battini et al. [87] ont proposé un modèle multi-objectif avec quatre objectifs différents pour évaluer l'impact des critères ergonomiques sur la performance d'équilibrage d'une ligne de production. Ils ont utilisé la dépense énergétique pour obtenir le niveau de l'ergonomie.

Récemment, plusieurs chercheurs ont considéré la planification des ressources humaines dans le domaine de l'équilibrage des lignes. L'intégration du problème d'affectation au problème d'équilibrage des lignes a été introduite par Miralles et al. [88] comme une extension du problème d'équilibrage des lignes d'assemblage. Dans une recherche menée par Vila and Pereira [89], l'affectation des opérateurs est étudiée pour un problème d'équilibrage d'une ligne d'assemblage, dans lequel la performance des opérateurs est considérée comme le paramètre principal de l'affectation. L'objectif est de minimiser la durée totale d'un cycle d'assemblage, tout en réduisant les temps d'inactivité des stations. Zacharia and Nearchou [90] ont présenté un problème d'équilibrage d'une ligne d'assemblage intégrant l'affectation des opérateurs. Un modèle mathématique est proposé et résolu au moyen d'un algorithme évolutionnaire multi-objectifs. Dans une autre recherche effectuée par Manavizadeh et al. [91], les opérateurs ayant une efficacité différente ont été classifiés en plusieurs catégories. Ils ont

supposé deux types d'opérateurs, permanents et temporaires, qui travaillent en période régulière et en heures supplémentaires. Ils ont proposé un recuit simulé pour résoudre l'équilibrage des lignes et l'affectation des opérateurs en différentes étapes.

Une intégration de l'affectation des opérateurs et du séquençage et d'équilibrage d'une ligne d'assemblage a été prise en considération dans une recherche réalisée par Cortez and Costa [92]. Dans ces travaux, un problème de séquençage d'une ligne d'assemblage a été étudié, dans lequel le temps d'exécution des tâches dépend des opérateurs. Ils ont considéré que les opérateurs sont hétérogènes avec différents niveaux de compétence et d'efficacité, dans leur modèle de séquençage et d'affectation. La minimisation du nombre d'opérateurs dans un problème d'équilibrage d'une ligne d'assemblage a été également étudié dans une recherche effectuée par Roshani and Giglio [93]. Dans cette étude, les opérateurs sont considérés homogènes avec le même niveau de compétence et d'efficacité, et les temps d'exécution des tâches sont indépendants des opérateurs.

Le facteur humain a été pris également en compte dans un problème d'équilibrage d'une chaîne d'assemblage dans Chiang et al. [94]. Les durées de traitement des tâches ont été supposées stochastiques en raison de la variation des performances des opérateurs. L'hypothèse des temps d'exécution des tâches non déterministes dépendant des niveaux de compétence des opérateurs a été prise en compte également dans Zeltzer et al. [95]. Il est important de noter que l'objectif de ces études est le lissage et l'équilibrage de la charge entre les postes de travail.

### 2.4.3 Rotation des tâches et des postes de travail

Les troubles musculo-squelettiques liés au travail se développent en raison de l'exposition à des facteurs de risque, et ils représentent un tiers de toutes les maladies professionnelles diagnostiquées dans le domaine manufacturier dans de nombreux pays (Chiasson et al. [96]). Ces dernières ont des conséquences financières et sociales importantes qui entraînent plus de 40% des coûts professionnels (Speklé et al. [97]). De nombreuses industries en France ont connu des augmentations du nombre de demandes d'indemnisation des employés au cours des dernières années en raison des facteurs de risque de troubles musculo-squelettiques liés au travail (Rivière et al. [98], Roquelaure et al. [99]). Les tâches répétitives, la posture de travail, le port des charges lourdes et la manutention des matériaux sont des facteurs de ces risques courants dans diverses industries (Falck et al. [100]). Il existe d'autres facteurs tels que la fréquence des actions, la durée des tâches répétitives sur une journée et le manque de temps de récupération qui intensifient l'impact de ces facteurs de risque (Berlin et al. [101]). Une approche ergonomique comprenant l'évaluation des facteurs de risque, l'ingénierie et les stratégies administratives doivent améliorer la situation sur le lieu de travail, afin de fournir des effets positifs sur le système et les performances humaines (Coté et al. [102], Fuller et al. [103], Widanarko et al. [104]).

Pour remédier à ces problèmes, les industries manufacturières font appel à la rotation des tâches, qui est considérée comme une approche organisationnelle permettant d'atténuer l'exposition à une

charge de travail physique élevée et à la monotonie. Les chercheurs recommandent souvent de réduire l'exposition aux facteurs de risque par la rotation des tâches (Fallentin et al. [105], Wells et al. [106]). Cette rotation permet de solliciter différents muscles et d'augmenter l'utilisation des différentes régions du corps. Mathiassen [107] a suggéré qu'une plus grande variation physique peut être une action efficace contre les troubles musculo-squelettiques pour les tâches répétitives. En outre, la stratégie de rotation des tâches a été fréquemment appliquée par les ingénieurs suite à la mise en œuvre du lean management, en raison de la nécessité de disposer de plus d'employés autonomes (Padula et al. [108]). Cependant, l'efficacité d'une stratégie de rotation des tâches dépend de l'identification des charges de travail, de l'évaluation du niveau d'exposition aux risques, ainsi que de la planification adéquate des ressources humaines (Otto and Scholl [78]).

Pour développer une stratégie de rotation des tâches, des études antérieures ont considéré plusieurs types de paramètres ergonomiques pour caractériser la charge de travail physique. Diverses méthodes ont été fréquemment utilisées pour évaluer la charge de travail physique, telles que les outils de mesure directe (Jonsson [109], Balogh et al. [110]), l'équation révisée de lever de charges du NIOSH<sup>3</sup>, l'évaluation rapide du membre supérieur RULA<sup>4</sup>, les actions répétitives au travail OCRA<sup>5</sup> (Asensio-Cuesta et al. [111], Otto and Scholl [112]), l'évaluation rapide de l'intégralité du corps REBA<sup>6</sup> (Triggs and King [113], Yoon et al. [114]), et les listes de contrôle. Cependant, peu d'études ont intégré divers paramètres biomécaniques tels que la répétition, les postures, la force, les manipulations de matériaux et la consommation d'énergie dans un modèle mathématique de rotation des tâches. Frazer et al. [115] ont proposé d'intégrer plusieurs facteurs de risque tels que la force et la répétition pour réduire efficacement la charge de travail physique. Leurs travaux reposent sur une étude expérimentale sur l'effet de la rotation des postes de travail sur les prédictions de risque de déclaration de lombalgie, en utilisant les deux approches LBPR<sup>7</sup> et TWA<sup>8</sup>. Dans une autre recherche, Leider et al. [116] ont montré que la connaissance de l'exposition à la charge physique de travail aux niveaux organisationnel et individuel pourrait faciliter la mise en œuvre de la rotation des postes de travail en tant qu'intervention ergonomique utile et facile à utiliser.

L'impact de l'approche de rotation des tâches sur les facteurs biomécaniques et le bien-être des opérateurs est analysé par Aptel et al. [117]. Ils ont conclu qu'un planning de rotation des tâches doit considérer toutes les dimensions du travail, en particulier les paramètres biomécaniques. Yoon et al. [114] ont proposé un planning de rotation des tâches dans une ligne d'assemblage de production qui réussit à réduire les charges de travail cumulées sur une zone corporelle. Les charges de travail physiques ont été identifiées et évaluées par l'outil REBA qui se focalise sur l'analyse posturale du corps entier. Cependant, l'aspect apprentissage et son coût/temps n'ont pas été considéré dans ce modèle mathématique. De Oliveira Sato and Coury [118] ont constaté une grande flexibilité

---

3. National Institute for Occupational Safety and Health.

4. Rapid Upper Limb Assessment.

5. Occupational Repetitive Actions.

6. Rapid Entire Body Assessment.

7. Low Back Pain Reporting.

8. Time Weighted Average.

dans un modèle d'exposition aux charges de travail physiques lorsque les opérateurs effectuent une rotation entre les postes de travail. Ainsi, des indicateurs appropriés doivent être envisagés pour évaluer les charges de travail physiques et être sensibles aux effets de la variabilité du travail. Otto and Scholl [78] ont confirmé qu'une analyse complète des charges de travail physiques plus proche et applicable aux contextes réels est nécessaire pour définir les paramètres et les fonctions objectives du modèle mathématique de rotation des postes de travail. Ainsi, leur article présente un programme linéaire binaire pour le problème de planification de rotation des tâches, qui utilise des facteurs ergonomiques spécifiques à la méthode EAWS<sup>9</sup> pour définir l'exposition au risque et la fonction objective du modèle mathématique. Ensuite, une méthode de résolution basée sur une heuristique de lissage est proposée. Ainsi, Moussavi et al. [119] ont proposé un modèle mathématique de rotation des tâches pour l'ordonnancement des ressources humaines dans une ligne d'assemblage de production. Ils ont analysé certains facteurs ergonomiques sur les opérateurs et les postes de travail dans le but d'affecter à chaque tâche l'opérateur le plus approprié.

L'application des plannings de rotation des tâches développés à des situations réelles a été moins prise en compte dans la littérature. L'effet d'oubli de l'apprentissage et le temps/coût qui lui est associé ont souvent été négligés dans les modèles de rotation des tâches, de sorte que ces modèles théoriques n'ont pas pu être appliqués à des situations réelles (Azizi et al. [79]). Les travaux de recherche présentés précédemment, portent sur des problèmes de rotation des tâches mono-objectifs, qui considèrent la productivité ou les facteurs ergonomiques comme une fonction objective.

Divers objectifs ont été visés dans le domaine de la planification des ressources humaines. Dans le problème classique, les objectifs économiques sont souvent pris en compte, tant dis que dans la rotation des tâches classique, les facteurs ergonomiques sont généralement pris en compte. De plus, il existe des recherches qui prennent en compte la productivité dans les modèles de rotation des tâches. Selon les recherches et les études effectuées, un objectif principal est généralement étudié et les autres aspects sont souvent ignorés ou très peu analysés. Certaines études ont considéré une optimisation multicritère dans la rotation des tâches, la planification et l'affectation des opérateurs, tout en prenant compte des facteurs humains dans le domaine de la production.

Costa and Miralles [74] ont étudié un problème de rotation des tâches et d'affectation des employés dans une chaîne de montage. Ils ont pris en compte uniquement les travailleurs handicapés et l'aspect formation dans leur modèle de rotation des tâches. L'optimisation des facteurs humains dans le domaine de production est considérée également dans les travaux de recherche effectués par Grosse et al. [120]. Ils ont étudié l'état de l'art de l'incorporation des facteurs humains dans la production et la logistique. Les troubles musculo-squelettiques liés au travail ont été pris en compte dans le modèle de rotation des tâches présenté par Botti et al. [121]. L'objectif est de réduire les risques ergonomiques et d'affecter les travailleurs qualifiés aux postes de travail. Ils ont proposé un modèle mathématique bi-objectifs pour leur stratégie de rotation des tâches. Dans d'autres recherches, Rossi

---

9. Ergonomic Assessment Worksheet.

et al. [122] ont proposé une approche AHP<sup>10</sup> pour évaluer divers scénarios intégrant des aspects de facteur humain et de productivité. Des approches d'optimisation de la rotation des tâches et d'affectation des opérateurs ont été aussi proposées par Diego-Mas et al. [123] et Hussin and Stützle [124].

Un autre problème d'optimisation intégrant des critères ergonomiques dans les systèmes de production est le problème de formation de cellules. Niakan et al. [125] ont proposé un modèle multi-objectifs en nombres mixtes pour un système de fabrication cellulaire, qui prend en compte des facteurs sociaux, ainsi que des critères économiques, et ils ont proposé un algorithme génétique hybride pour résoudre leur modèle mathématique. Akyol and Baykasoğlu [126] ont étudié un problème intégrant l'affectation des opérateurs et l'équilibrage des lignes de production, en considérant des risques ergonomiques. Une approche de résolution basée sur une heuristique a été proposée pour résoudre ce problème.

La Table 2.1 présente une synthèse bibliographique sur les travaux de recherche réalisés dans la littérature, portant sur l'intégration des facteurs humains dans la conception des systèmes de production, avec les approches de modélisation et de résolutions utilisées dans chaque étude.

---

10. Analytic Hierarchy Process.

Auteur	Année	Objectif de l'étude	Modélisation	Résolution
Problème étudié	2020	Planification de la production en restauration hospitalière avec la prise en compte des facteurs humains, organisation et ordonnancement du travail quotidien des employés avec minimisation de la durée du cycle de production	Mixed Linear Programming	Cplex, heuristiques algorithmes génétiques recherches locales itérées
Li et al. [127]	2019	Planification des horaires de travail du personnel, tout en minimisant le temps d'exécution des tâches et en réduisant la fatigue et la charge de travail des employés	Mixed-Integer Programming	Heuristique
Moussavi et al. [128]	2019	Planification des tâches des opérateurs avec l'équilibrage de leur charge de travail quotidienne globale	Mixed-Integer Programming	Gurobi
Moussavi [129]	2018	Planification du personnel en prenant en compte des aspects humains et des facteurs ergonomiques dans le domaine manufacturier, développement des modèles pour l'affectation des opérateurs aux tâches, dont l'objectif consiste à réduire la durée du cycle de production et à équilibrer la charge de travail des employés	Mixed-Integer Programming	Cplex, Gurobi méthodes hybrides
Ruiz-Torres et al. [130]	2018	Planification du personnel avec la prise en compte de leur satisfaction, les métriques de préférence et de variété des tâches souhaitables sont utilisées pour modéliser la satisfaction des employés	Binary Integer Programming	Cplex
Shuib and Kamarudin [131]	2018	Planification des horaires de travail du personnel en prenant en compte leurs préférences des jours de congés	Binary Integer Programming	Matlab
Ağralı et al. [132]	2017	Planification du personnel tout en maximisant leur satisfaction en leur affectant des tâches plus appropriées à leurs compétences, en minimisant les tâches supplémentaires et en maximisant l'équité entre eux	Mixed-Integer Programming	Cplex, Gurobi
Zeltzer et al. [95]	2017	Planification du personnel avec équilibrage de la charge des postes de travail	Mixed-Integer Programming	Heuristique
Moussavi et al. [84]	2017	Planification ergonomique des opérateurs avec l'amélioration de la productivité dans un système de chaîne de montage	Mixed-Integer Programming	Métaheuristique
Moussavi et al. [119]	2016	Planification ergonomique des employés avec minimisation de la durée du cycle de production quotidien	Mixed-Integer Programming	Gurobi
Akyol and Baykasoglu [126]	2016	Développement d'une approche de résolution pour l'affectation du personnel avec l'équilibrage de la charge de travail et la prise en compte des risques ergonomiques	-	Heuristique
Battini et al. [87]	2015	Planification des opérateurs en équilibrant la charge de travail et en réduisant la fatigue	Mixed Integer Programming	-
Sungur et al. [133]	2015	Planification des horaires de travail du personnel avec plusieurs fenêtres de pauses de durées différentes pour chaque poste et des périodes de repos pour les employés	Integer Linear Programming	Cplex
Huang and Pan [80]	2014	Évaluation des risques de travail en fonction de l'anthropométrie de l'opérateur et les besoins des tâches qui lui sont attribuées, développement d'une métaheuristique permettant de réduire les risques moyens et de diminuer le nombre d'opérateurs confrontés au niveau de risque le plus élevé	-	Optimisation par essais particuliers
Wang and Liu [134]	2014	Planification des horaires de travail en minimisant la fatigue maximale des employés et en satisfaisant leurs demandes des jours de repos et de congés	Mixed-Integer Programming	Xpress IVE



Auteur	Année	Objectif de l'étude	Modélisation	Résolution
Eid et al. [135]	2013	Développement d'un modèle mathématique pour personnaliser les techniques de relaxation pour la gestion du stress	Integer	Outil de simulation
Moreira and Costa [76]	2013	Développement d'une approche de résolution pour l'équilibrage de la charge de travail des employés tout en prenant compte des horaires de rotation des postes	Mixed-Integer Programming	Méthode hybride
Rattanamane and Nanthavanij [77]	2013	Planification du personnel en prenant en considération des contraintes ergonomiques, dont l'objectif consiste à déterminer le nombre minimal d'opérateurs utilisés sur période de planification donnée, de sorte que les expositions quotidiennes aux risques de travail n'excèdent pas une limite autorisée	Integer Linear Programming	Cplex
Otto and Scholl [78]	2013	Équilibrage des risques ergonomiques en utilisant la rotation des tâches, évaluation des risques liés aux différentes tâches d'une ligne de production	Binary Integer Programming	Heuristique et recherche tabou
Othman et al. [75]	2012	Planification des effectifs en prenant en compte des facteurs humains et en minimisant leur niveau de fatigue	Mixed-Integer Programming	Heuristique
Akbari et al. [136]	2012	Développement des approches de résolution pour maximiser la satisfaction des employés tout en prenant en compte leurs disponibilités, leurs productivités, leurs préférences, leurs niveaux d'ancienneté	Mixed-Integer Programming	Recuit simulé, recherche à voisinage variable
Azizi et al. [79]	2010	Planification du personnel tout en réduisant l'ennui et le mal-être des employés	Integer Programming	algorithme génétique et recuit simulé
Costa and Miralles [74]	2009	Développement d'une heuristique permettant de minimiser le nombre de tâches différentes exercées par chaque opérateur	Mixed-Integer Programming	Heuristique
Elshafei and Alfares [71]	2008	Planification du personnel avec minimisation de leur charge de travail	Integer Linear Programming	Programmation dynamique
Seçkiner and Kurt [72]	2008	Planification du personnel avec minimisation de leur charge de travail	Integer Programming	Colonies de fourmis
Mohan [137]	2008	Planification du personnel avec maximisation de leur satisfaction	Integer Programming	Branch-and-cut
Aptel et al. [117]	2008	Analyse de l'impact de l'approche de rotation des postes sur les facteurs du bien-être des employés	-	-
Alfares [70]	2002	Planification du personnel en minimisant le nombre d'employés requis et en prenant en compte des jours de travail successifs et des jours de congés successifs	Integer Programming	Dual linear programming

TABLE 2.1 – Synthèse bibliographique sur des travaux de recherche portant sur la prise en compte du facteur humain dans les systèmes de production.



D'après les travaux de recherche existants dans la littérature, menés dans le cadre de l'intégration des facteurs humain dans la conception des systèmes de production, on peut conclure que la plupart des travaux ont été axés sur le contexte d'équilibrage des chaînes d'assemblage et de production, de l'affectation des opérateurs et de la rotation des tâches. Cependant, à notre connaissance, aucune étude n'a été effectuée dans un contexte visant la planification et l'ordonnement de la production et l'organisation du travail. Malgré, leur importance majeure et leur impact sur l'efficacité des systèmes et notamment sur la performance et le bien-être de l'humain dans son milieu de travail. Dans la section suivante, un état de l'art est présenté, sur le problème de planification et d'ordonnement des processus de production alimentaire, sur lequel se focalise particulièrement cette étude.

## 2.5 Planification et ordonnancement des processus de production alimentaire

Le problème d'ordonnement de la production dans les industries alimentaires appartient à la classe des problèmes d'ordonnement avec setup séquence-dépendant qui sont NP-difficile (Sun et al. [138]). Les résultats prometteurs des méthodes d'ordonnement, tels que la réduction des coûts de production et l'augmentation de la performance organisationnelle des systèmes de production, ont stimulé des efforts de recherche considérables. Les travaux existants dans la littérature sont classés en fonction du nombre de produits (produits uniques ou produits multiples), du type de système de production et des dates de péremption des produits, qui peuvent être connues ou inconnues (Table 2.2).

Auteur	Année	Nb produits	Système	DLC	Modélisation	Domaine
Problème étudié	2020	MP	FJSP	Connue	MLP	RH
Wei et al. [139]	2019	MP	FS	Inconnue	MILP	IA
Sargut and Işık [140]	2017	SP	SM	Inconnue	-	IA
Copil et al. [141]	2017	MP	MP	Inconnue	-	IA
Stefansdottir et al. [142]	2017	SP	FS	Inconnue	MILP	IL
Acevedo-Ojeda et al. [143]	2015	SP	SM	Inconnue	MIP	IA
Bilgen and Çelebi [144]	2013	MP	FS	Inconnue	MILP	IL
Kopanos et al. [145]	2012	SP	FS	Inconnue	MILP	IA
Kılıç [146]	2011	SP	FS	Inconnue	MILP	IL
Karray et al. [147]	2011	MP	SM	Inconnue	ILP	IA
Georgiadis et al. [148]	2010	SP	FS	Inconnue	MILP	IL
Günther et al. [149]	2006	SP	FS	Inconnue	MILP	IA

MP : multi-produits, SP : mono-produits, FJSP : job-shop flexible, FS : flow shop, SM : machine unique, MP : machines parallèles, DLC : date limite de consommation, RH : restauration hospitalière, IA : industrie alimentaire, IL : industrie laitière.

TABLE 2.2 – Synthèse bibliographique sur les problèmes d'ordonnement des processus de production alimentaire.

Le problème d'ordonnancement de production à produit unique, a été largement étudié dans la littérature. Lütke Entrup et al. [150] ont proposé trois modèles de programmation linéaire en nombres mixtes pour les problèmes d'ordonnancement de la production dans l'industrie laitière, en tenant compte des durées de conservation et des limites de la capacité de fermentation. Doganis and Sarimveis [151] ont proposé un modèle mathématique permettant d'ordonner les process d'une ligne de production traitant un seul produit. Ce modèle prend en compte les contraintes standards rencontrées en ordonnancement de la production (équilibre de la charge des machines, capacité de stock, capacités de machines, etc). Ce dernier prend également en compte les particularités qui caractérisent la production laitière, et qui constituent des limitations dans la séquence de production, en raison des différentes teneurs en matières grasses et saveurs des divers produits, ainsi que des coûts et des temps de préparation dépendant de la séquence. Cependant, le modèle proposé est limité à une seule ligne de production. Dans une autre étude, Doganis and Sarimveis [152] ont présenté une méthodologie pour l'ordonnancement d'une ligne d'emballage et de conditionnement composée de plusieurs machines parallèles. La méthodologie intègre des caractéristiques qui permettent de répondre à des problèmes spécifiques à l'industrie, tels que des dates d'échéance intermédiaires multiples, le fractionnement des tâches, la vitesse de la machine en fonction du produit, la taille minimale et maximale des lots de production, ainsi que les coûts et les temps de changement en fonction de la séquence. Néanmoins, le modèle mathématique proposé n'intègre pas les décisions de production en plusieurs étapes et il ignore certaines caractéristiques spécifiques à l'industrie, telles que la durée de conservation des produits. Stefansdottir et al. [142] ont développé un modèle d'optimisation générique pour le dimensionnement et l'ordonnement des lots de production dans le cadre de l'industrie de transformation des ateliers à flux. Kılıç [146] a proposé des modèles mathématiques et des heuristiques pour la planification et l'ordonnancement de la production dans les industries de transformation, en tenant compte de leurs caractéristiques. Georgiadis et al. [148] et Günther et al. [149] ont développé des modèles mathématiques pour les problèmes d'ordonnancement de type flow shop traitant un seul produit. Sargut and Işık [140] ont présenté un modèle mathématique pour un problème de dimensionnement des lots de production avec une seule machine et un seul produit périssable sous contraintes de capacités de production. Ils ont proposé une heuristique basée sur la programmation dynamique pour la résolution du problème étudié.

De nombreuses études ont été réalisées dans la littérature sur l'ordonnancement multi-produits dans l'industrie alimentaire. Akkerman and van Donk [153] ont développé une méthodologie pour l'analyse des problèmes d'ordonnancement dans la production des aliments. Cette méthodologie permet de comprendre, décrire et structurer les problèmes d'ordonnancement de production alimentaire et d'évaluer les structures organisationnelles et les flux d'information liés à l'ordonnancement. Smith-Daniels and Ritzman [154] ont développé un modèle de dimensionnement des lots pour les industries alimentaires et ils ont appliqué le modèle proposé à une situation représentative d'une installation de transformation alimentaire. Kopanos et al. [145] ont proposé une modélisation mathématique efficace pour l'ordonnancement de la production dans l'industrie agro-alimentaire. Karray et al. [147] ont développé des algorithmes génétiques parallèles pour les problèmes d'ordonnancement à une machine

et multi-produits. Wauters et al. [155] ont introduit une approche intégrée pour l'ordonnancement de la production et il ont démontré son application à l'industrie alimentaire. Dans ces travaux, l'ordonnancement doit traiter une combinaison de processus discrets, continus et discontinus avec des caractéristiques particulières au problème étudié. Acevedo-Ojeda et al. [156] ont présenté un problème de dimensionnement des lots avec une seule machine qui intègre la périssabilité des matières premières et ils ont analysé la façon dont ces considérations ont imposé des contraintes spécifiques sur un ensemble de décisions fondamentales, en particulier pour les structures à plusieurs niveaux. Trois variantes du problème de dimensionnement des lots à deux niveaux intégrant différents types de périssabilité des matières premières, durée de conservation fixe des produits, dégradation des qualités de produits, ont été étudiées. Pour chaque variante, des formulations de programmation mathématique en nombres mixtes, ont été proposées, et des expériences de calcul avec des analyses de sensibilité, ont été réalisées. Copil et al. [141] ont considéré un problème dynamique de dimensionnement des lots avec machines parallèles pour l'industrie alimentaire, dans lequel un produit donné fabriqué pendant une période de temps est utilisé pour satisfaire la demande. Niaki et al. [157] ont abordé le problème intégré de dimensionnement des lots et d'ordonnancement de la production alimentaire dans les systèmes de fabrication par lots avec de multiples ressources communes partagées, et ils ont proposé une nouvelle formulation de programmation linéaire en nombres mixtes avec des fonctions multi-objectifs. Wei et al. [139] ont proposé une formulation mathématique pour le problème de dimensionnement des lots et d'ordonnancement de production dans un système de type flow-shop à plusieurs niveaux pour intégrer les aspects de périssabilité des produits.

Concernant la prise en compte de la durée de conservation des produits, Ahumada and Villalobos [158] ont proposé des modèles mathématiques pour l'ordonnancement de la production dans l'industrie agro-alimentaire, où les produits peuvent être périssables ou non périssables. Dans leurs travaux, ils se focalisent particulièrement sur la planification des achats et des récoltes. Sel et al. [159] ont présenté des approches de résolutions pour la planification et l'ordonnancement de production, en tenant compte des restrictions de la durée de conservation des produits, des vitesses des machines qui dépendent des produits traités, des dates d'échéance de la demande et des heures de travail régulières et supplémentaires dans une chaîne d'approvisionnement périssable. Arbib et al. [160] ont proposé un modèle mathématique tridimensionnel pour l'ordonnancement de la production des denrées périssables, qui a été traité sous deux aspects indépendants : la périssabilité relative des produits alimentaires et la faisabilité du temps de lancement/d'achèvement. Basnet et al. [161] ont développé un algorithme exact pour résoudre un problème d'ordonnancement et de séquence dans la même industrie. Chen et al. [162] ont fourni une revue de la littérature sur l'intégration des problèmes d'ordonnancement et du dimensionnement des lots pour les produits alimentaires périssables, et ils ont classé les travaux de la littérature selon les caractéristiques de ces problèmes, ainsi que les stratégies utilisées pour modéliser l'aspect de périssabilité des produits.

Enfin, il convient de mentionner qu'à notre connaissance, il n'existe pratiquement aucune étude traitant le problème d'ordonnancement des processus de production alimentaire en restauration

hospitalière ou collective. La plupart des travaux existants dans la littérature sur la planification et l'ordonnancement des processus de production alimentaire sont issus de l'industrie alimentaire et laitière, où les systèmes de production sont de type machine parallèle, flow shop et machine unique. De plus, dans la majorité de ces travaux, la date limite de consommation des produits est inconnue, alors que dans cette étude, elle est connue. Les travaux de la littérature ne peuvent pas être adaptés au problème traité dans cette étude, puisque les systèmes de production sont différents. De plus, plusieurs contraintes spécifiques liées au regroupement des lots des tâches et à la présence de différents types de ressources n'ont pas été prises en compte dans les travaux existants, et il ne s'agit pas du même critère d'optimisation étudié.

## 2.6 Étude bibliographique sur le FJSP

Dans le présent travail, le système de production étudié est considéré comme un système job shop flexible (FJSP). Depuis 1990, ce type de problème a été largement traité dans la littérature. Liu and MacCarthy [163] ont étudié le problème dans un système de fabrication flexible et ils ont développé un modèle de programmation linéaire en nombres mixtes et des heuristiques pour minimiser le makespan, le temps de complétion moyen et le retard maximal des tâches. Guimaraes and Fernandes [164] ont proposé un algorithme génétique pour le FJSP, dont l'objectif consiste à minimiser le makespan et le retard moyen. Saidi-Mehrabad and Fattahi [165] ont traité un cas particulier de FJSP, où chaque opération peut être affectée à l'une des deux machines parallèles. Ils ont développé un algorithme de recherche tabou pour résoudre les sous-problèmes d'affectation et de séquençement. Cet algorithme a été comparé à un algorithme de branch and bound et il a été testé sur plusieurs instances test générées aléatoirement. Defersha and Chen [166] ont étudié le FJSP avec des temps de préparation attachés et détachés, des dates de disponibilité des machines et des contraintes liées au décalage temporel. Pour ce problème, un modèle de programmation linéaire en nombres mixtes a été proposé, et un algorithme génétique parallèle a été développé. Mati et al. [167] ont proposé un algorithme génétique pour le FJSP avec des contraintes de blocage. Bagheri and Zandieh [168] ont développé un algorithme de recherche à voisinage variable pour résoudre un FJSP standard. Mousakhani [169] a présenté un modèle de programmation linéaire en nombres mixtes et un algorithme de recherche locale itérée, dont l'objectif vise à minimiser le retard total. Chaudhry and Khan [3] ont publié une revue de littérature sur les méthodes utilisées pour résoudre le FJSP et les différentes fonctions objectives étudiées (Figure 2.9).

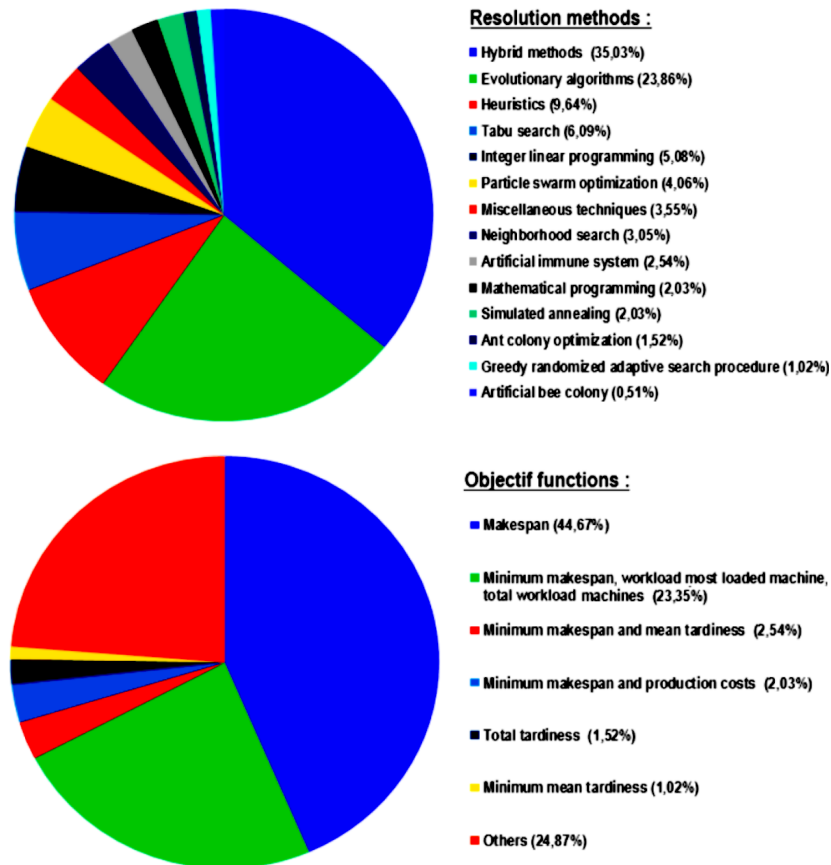


FIGURE 2.9 – Synthèse bibliographique sur les méthodes de résolution utilisées pour le FJSP et les fonctions objectives étudiées dans la littérature. (Chaudhry and Khan [3]).

Dans cette étude bibliographique, il a été constaté que près de 59 % des travaux de la littérature utilisent des méthodes hybrides (Tanev et al. [170], Rajabinasab and Mansour [171], Geyik and Dosdoğru [172], Zhou and Zeng [173], Doh et al. [174], ) ou des algorithmes évolutionnaires (Tanev et al. [170], Nie et al. [175]). La minimisation du makespan s'est avérée être le critère d'optimisation le plus étudié. Dans 88 articles de recherche (44,67 %), le makespan a été utilisé comme critère mono-objectif, et dans 78 papiers (39,59 %), il a été utilisé comme critère multi-objectifs en combinaison avec d'autres fonctions objectives (Gao et al. [176], Yin et al. [177], Lee et al. [178], Liu et al. [179]). Néanmoins, la minimisation du temps de séjour des tâches dans un système de production  $\sum_i C_i$ , qui est le critère cible dans le présent travail, a été très peu étudié dans la littérature. La Table 4.1 présente une synthèse des travaux de recherche sur les problèmes job-shop flexible avec minimisation du flow time. Ces travaux sont classés selon les domaines d'application, les méthodes de résolution utilisées et les fonctions objectives étudiées.

Auteur	Année	Application	Méthode de résolution	Fonction objective
Problème étudié	2020	Recherche et industrie	Modèle mathématique et métaheuristiques pour un job shop flexible avec setup séquence dépendant et fractionnement des tâches	Min flow time total
Gao et al. [176]	2018	Recherche	Modèle mathématique et algorithme Jaya discret	Min makespan, flow time total, charge de travail des machines et charge de travail totale des machines
Yin et al. [177]	2017	Recherche	Approches de résolution pour l'affectation des ressources et le séquençement des tâches dans un job shop flexible automatisé	Min makespan, nombre de tâches en retard, flow time total et flow time total pondéré
Nie et al. [175]	2013	Recherche	Programmation de l'expression génétique pour un problème job shop flexible dynamique avec des dates de disponibilité des tâches	Min makespan, flow time moyen et retard moyen
Doh et al. [174]	2013	Recherche	Heuristique avec des règles de priorité	Min makespan, flow time total, retard moyen, nombre de tâches en retard et retard maximum
Lee et al. [178]	2012	Recherche	Heuristique	Min makespan et flow time moyen
Liu et al. [179]	2009	Recherche	Optimisation par essais particuliers	Min makespan du flow time total
Tanev et al. [170]	2004	Industrie	Algorithme génétique et règles de priorité	Min ratio des tâches en retard, variance du flow time, nombre de changements des pièces et max de l'efficacité des machines

TABLE 2.3 – Travaux de recherche sur les problèmes job-shop flexibles avec minimisation du flow time.

## 2.7 Modèles mathématiques pour le FJSP

Selon Demir and İşleyen [180], les modèles mathématiques pour le problème job-shop flexible (FJSP) peuvent être distingués selon le type des variables de décision dont ils dépendent pour déterminer la séquence des opérations sur les machines. Ces variables de décision sont classées en variables de séquence, variables de précédence et variables indexées sur le temps. Ces trois types de variables sont développés par Wagner [181], Manne [182] et Bowman [183], respectivement. Dans cette section, nous présentons trois modèles mathématiques basés sur ces variables de décision, qui sont inspirés de Demir and İşleyen [180]. Le premier modèle mathématique fait partie de la catégorie des modèles basés sur la séquence, et les deux autres modèles sont classés dans la catégorie des modèles basés sur la précédence. À la fin de cette section, un modèle mathématique proposé dans la littérature pour le problème FJSP avec des setups dépendants de la séquence (FJSP-SDST) est présenté.

### Notations pour les modèles mathématiques introductifs

Dans cette partie, une description du problème FJSP et les notations des modèles mathématiques proposés dans la littérature sont présentées. Considérons un système de production composé de  $M$  machines et  $n$  de tâches indépendantes qui doivent être ordonnancées dans le système de production. Chaque tâche  $i$  est composée d'un ensemble d'opérations  $J_i$  qui doivent être réalisées selon une séquence prédéfinie. Chaque opération peut être traitée par une seule ressource parmi un ensemble de machines alternatives. Toutes les machines sont disponibles à l'instant zéro. De plus, la préemption des opérations n'est pas autorisée, et aucun setup n'est considéré pour les machines. Dans la plupart des modèles proposés dans la littérature, l'objectif est de minimiser le makespan de l'ordonnancement. Nous présentons par la suite les notations utilisées dans les modèles introductifs.

#### Paramètres :

- $M$  : ensemble des machines, où  $m = |M|$  ;
- $N$  : ensemble des tâches, où  $n = |N|$  ;
- $J_i$  : ensemble des opérations de la tâche  $i \in N$  ;
- $M_{ij} \subset M$  : ensemble des machines éligibles pour l'opération  $j \in J_i$  de la tâche  $i \in N$  ;
- $M_{ijk}$  : paramètre binaire, qui est égale à 1 si l'opération  $j \in J_i$  de la tâche  $i \in N$  peut être réalisée par la machine  $k \in M_{ij}$ , 0 sinon ;
- $M_k$  : ensemble d'opérations qui peuvent être effectuées sur la machine  $k \in M$  ;
- $P'_{ijk}$  : durée de traitement unitaire de l'opération  $j \in J_i$  de la tâche  $i \in N$  sur la machine  $k \in M_{ij}$  ;
- $P_{ijk}$  : durée de traitement de l'opération  $j \in J_i$  de la tâche  $i \in N$  sur la machine  $k \in M_{ij}$  ;
- $B$  : entier très grand.

**Variables de décision :**

- $X_{ijk}$  : variable binaire de valeur 1 si l'opération  $j \in J_i$  de la tâche  $i \in N$  est affectée à la machine  $k \in M_{ij}$ , 0 sinon ;
- $x_{ijkp}$  : variable binaire de valeur 1 si l'opération  $j \in J_i$  de la tâche  $i \in N$  est réalisée à la  $p^{eme}$  position sur la machine  $k \in M_{ij}$ , 0 sinon ;
- $Z_{ijhpk}$  : variable binaire de valeur 1 si l'opération  $j \in J_i$  de la tâche  $i \in N$  précède l'opération  $g \in J_h$  de la tâche  $h \in N$  sur la machine  $k \in M_{ij} \cap M_{hg}$ , 0 sinon ;
- $P_{ij}$  : durée de traitement de l'opération  $j \in J_i$  de la tâche  $i \in N$  après la sélection de la machine permettant de traiter cette opération ;
- $S_{ij}$  : date de début de traitement de l'opération  $j \in J_i$  de la tâche  $i \in N$  ;
- $S_{ijk}$  : date de début de traitement de l'opération  $j \in J_i$  de la tâche  $i \in N$  sur la machine  $k \in M_{ij}$  ;
- $\hat{S}_{kp}$  : date de début de traitement de l'opération effectuée à la  $p^{eme}$  position sur la machine  $k \in M$  ;
- $C_{ij}$  : date de fin de traitement de l'opération  $j \in J_i$  de la tâche  $i \in N$  ;
- $C_{ijk}$  : date de fin de traitement de l'opération  $j \in J_i$  de la tâche  $i \in N$  sur la machine  $k \in M_{ij}$  ;
- $C_i$  : date de fin de traitement de la tâche  $i \in N$  ;
- $C_{max}$  : makespan de l'ordonnancement.

**Modèles basés sur les variables de séquence**

Ce type de modèles a été proposé pour la première fois par Wagner [181], il est basé sur le concept selon lequel la machine  $k$  a un nombre fixe de séries de production (positions)  $P_k$  et chaque série de production peut être affectée à au plus une tâche. Ainsi, l'affectation des opérations aux séries de production d'une machine donnée détermine la séquence des tâches sur cette machine. Le modèle suivant a été adopté à l'origine par Fattahi et al. [184].

**Objectif**

$$Min C_{max} \tag{2.1}$$

**Avec les contraintes :**

$$C_{max} \geq S_{ij} + P_{ij}, \quad \forall i \in N, j \in J_i; \tag{2.2}$$

$$\sum_k P'_{ijk} \cdot X_{ijk} = P_{ij}, \quad \forall i \in N, j \in J_i; \tag{2.3}$$

$$S_{ij} + P_{ij} \leq S_{ij+1}, \quad \forall i \in N, j \in J_i; \tag{2.4}$$

$$\hat{S}_{kp} + P_{ij} \cdot x_{ijkp} \leq \hat{S}_{kp+1}, \quad \forall i \in N, j \in J_i, k \in M_{ij}, p \in P_k; \tag{2.5}$$



$$\hat{S}_{kp} \leq S_{ij} + (1 - x_{ijkp}) \cdot B, \quad \forall i \in N, j \in J_i, k \in M_{ij}, p \in P_k; \quad (2.6)$$

$$\hat{S}_{kp} + (1 - x_{ijkp}) \cdot B \geq S_{ij}, \quad \forall i \in N, j \in J_i, k \in M_{ij}, p \in P_k; \quad (2.7)$$

$$X_{ijk} \leq M_{ijk}, \quad \forall i \in N, j \in J_i, k \in M_{ij}; \quad (2.8)$$

$$\sum_i \sum_j x_{ijkp} = 1, \quad \forall k \in M_{ij}, p \in P_k; \quad (2.9)$$

$$\sum_k X_{ijk} = 1, \quad \forall i \in N, j \in J_i; \quad (2.10)$$

$$\sum_p x_{ijkp} = X_{ijk}, \quad \forall i \in N, j \in J_i, k \in M_{ij}; \quad (2.11)$$

$$S_{ij} \geq 0, P_{ij} \geq 0, \hat{S}_{kp} \geq 0, \quad \forall i \in N, j \in J_i, k \in M_{ij}, p \in P_k; \quad (2.12)$$

$$x_{ijkp}, X_{ijk} \in \{0, 1\} \quad \forall i \in N, j \in J_i, k \in M_{ij}, p \in P_k; \quad (2.13)$$

La contrainte (2.2) représente la fonction objectif qui consiste à minimiser le makepan. La contrainte donnée par l'équation (2.3) détermine le temps de traitement de l'opération  $j \in J_i$  de la tâche  $i \in N$  sur la machine choisie pour effectuer cette opération. La contrainte (2.4) impose que chaque opération  $j + 1$  de la tâche  $i \in N$  ne peut être commencée qu'après l'achèvement de l'opération  $j \in J_i$  de la même tâche. La contrainte donnée par l'équation (2.5) assure que la machine  $k \in M$  ne peut traiter qu'une seule opération en même temps. Les contraintes (2.6) et (2.7) indiquent que la date de début de traitement de l'opération  $j \in J_i$  de la tâche  $i \in N$ , est égale à la date de début de traitement de l'opération située à la  $p^{eme}$  position sur la machine  $k \in M_{ij}$ , si la  $j^{eme}$  opération de la tâche  $i \in N$  est effectuée à la position  $p$  sur la machine  $k \in M_{ij}$ . La contrainte donnée par l'équation (2.8) permet de définir l'ensemble des machines éligibles pour chaque opération. La contrainte (2.9) stipule que, chaque opération doit être affectée à une seule série de production d'une machine. La contrainte (2.10) impose que chaque opération d'une tâche peut être traitée sur une seule machine en même temps. Les contraintes (2.12) et 2.13) définissent les domaines de variables de décision.

### Modèles basés sur les variables de précédence

Ce type de modèles basé sur les variables de précédence, a été introduit pour la première fois par Manne [182]. Ces variables sont utilisées pour indiquer la séquence des opérations, qui sont affectées à la même machine. Si  $Z_{ijhgk}$  prend la valeur 1, alors l'opération  $j \in J_i$  de la tâche  $i \in N$  précède l'opération  $g \in J_h$  de la tâche  $h \in N$  sur la machine  $k \in M_{ij} \cap M_{hg}$ . Cependant, il n'est pas nécessaire que l'opération  $g \in J_h$  de la tâche  $h \in N$  soit effectuée immédiatement après l'opération

$j \in J_i$  de la tâche  $i \in N$ . Dans cette section, deux modèles basés sur les variables de précédence proposés dans la littérature sont présentés.

Le premier modèle a été conçu par Gao et al. [185], il se base principalement sur les dates de fin de traitement des opérations  $C_{ij}$  et les variables de précédence  $Z_{ijhgk}$ .

### Objectif

$$\text{Min } C_{max} \quad (2.14)$$

### Avec les contraintes :

$$C_{max} \geq C_{ij}, \quad \forall i \in N, j \in J_i; \quad (2.15)$$

$$C_{ij} - C_{ij-1} \geq P'_{ijk} \cdot X_{ijk}, \quad \forall i \in N, j \in J_i, k \in M_{ij}; \quad (2.16)$$

$$C_{i1} \geq P'_{i1k} \cdot X_{i1k}, \quad \forall i \in N, k \in M_{ij}; \quad (2.17)$$

$$(C_{hg} - C_{ij} - P'_{hjk}) \cdot X_{ijk} \cdot X_{hgk} \cdot Z_{ijhgk} \geq 0, \quad \forall i \in N, j \in J_i, h \in N, g \in J_h, k \in M_{ij} \cap M_{hg}; \quad (2.18)$$

$$(C_{ij} - C_{hg} - P'_{ijk}) \cdot X_{ijk} \cdot X_{hgk} \cdot Z_{hgijk} \geq 0, \quad \forall i \in N, j \in J_i, h \in N, g \in J_h, k \in M_{ij} \cap M_{hg}; \quad (2.19)$$

$$\sum_k X_{ijk} = 1, \quad \forall i \in N, j \in J_i; \quad (2.20)$$

$$Z_{ijhgk} + Z_{hgijk} = X_{ijk} \cdot X_{hgk}, \quad \forall i \in N, j \in J_i, h \in N, g \in J_h, k \in M_{ij} \cap M_{hg}; \quad (2.21)$$

$$C_{ij} \geq 0, \quad \forall i \in N, j \in J_i; \quad (2.22)$$

$$X_{ijk} \in \{0, 1\} \quad \forall i \in N, j \in J_i, k \in M_{ij}; \quad (2.23)$$

La contrainte (2.15) permet de calculer le makepan. La contrainte (2.16) assure que l'ordre de précédence entre les opérations des tâches est respecté. La contrainte donnée par l'équation (2.17) garantit que la date d'achèvement de la première opération de la tâche  $i \in N$  est supérieure à sa durée de traitement. Les contraintes (2.18) et (2.19) indiquent que pour toute paire d'opérations  $j \in J_i$  et  $g \in J_h$  réalisées par la même machine  $k \in M_{ij} \cap M_{hg}$ , il existe deux cas possibles, soit l'opération  $j \in J_i$  ne peut pas être commencée avant la fin de traitement de l'opération  $g \in J_h$ , et vice-versa. La contrainte (2.20) impose que chaque opération doit être affectée à une seule machine. La contrainte (2.21) stipule que, pour chaque couple d'opérations  $j \in J_i$  et  $g \in J_h$ , une seule relation de précédence relie les deux opérations entre elles.

Le deuxième modèle a été proposé premièrement par Kim and Egbelu [186]. Ce modèle est basé principalement sur les dates de début de traitement des opérations  $S_{ijk}$  et les variables de précédence  $Z_{ijhgk}$ .

## Objectif

$$\text{Min } C_{max} \quad (2.24)$$

### Avec les contraintes :

$$C_{max} \geq S_{ij} + \sum_k P'_{ijk} \cdot X_{ijk}, \quad \forall i \in N, j \in J_i; \quad (2.25)$$

$$S_{ij} + \sum_k P'_{ijk} \cdot X_{ijk} \leq S_{ij+1}, \quad \forall i \in N, j \in J_i; \quad (2.26)$$

$$\sum_k X_{ijk} = 1, \quad \forall i \in N, j \in J_i; \quad (2.27)$$

$$S_{ijk} = S_{ij} \cdot X_{ijk}, \quad \forall i \in N, j \in J_i, k \in M_{ij}; \quad (2.28)$$

$$S_{ijk} + P'_{ijk} \cdot X_{ijk} - B \cdot (1 - Z_{ijhkg}) \leq S_{hkg}, \quad \forall i \in N, j \in J_i, h \in N, g \in J_h, k \in M_{ij} \cap M_{hg}; \quad (2.29)$$

$$S_{hkg} + P'_{hkg} \cdot X_{hkg} - B \cdot (1 - Z_{hgijk}) \leq S_{ijk}, \quad \forall i \in N, j \in J_i, h \in N, g \in J_h, k \in M_{ij} \cap M_{hg}; \quad (2.30)$$

$$Z_{ijhkg} + Z_{hgijk} = X_{ijk} \cdot X_{hkg}, \quad \forall i \in N, j \in J_i, h \in N, g \in J_h, k \in M_{ij} \cap M_{hg}; \quad (2.31)$$

$$S_{ij} \geq 0, S_{ijk} \geq 0, \quad \forall i \in N, j \in J_i, k \in M_{ij}; \quad (2.32)$$

$$X_{ijk}, X_{hkg}, Z_{ijhkg}, Z_{hgijk} \in \{0, 1\}, \quad \forall i \in N, j \in J_i, h \in N, g \in J_h, k \in M_{ij} \cap M_{hg}; \quad (2.33)$$

La contrainte (2.25) consiste à déterminer le makepan. La contrainte (2.26) assure que l'ordre de précedence entre les opérations des tâches est respecté. La contrainte (2.27) impose que chaque opération doit être affectée à une seule machine. La contrainte donnée par l'équation (2.28) permet de modéliser la relation entre les variables de décision  $S_{ijk}$  et  $S_{ij}$ . Les contraintes (2.29) et (2.30) déterminent l'orientation de la paire d'opérations  $j \in J_i$  et  $g \in J_h$ , si ces deux opérations sont réalisées par la même machine, et imposent également à chaque machine de traiter une seule opération en même temps. La contrainte (2.31) assure qu'une seule relation de précedence relie le couple d'opérations  $j \in J_i$  et  $g \in J_h$  entre elles.

## Modèles indexés sur le temps

Ce type de modèles est basé sur les variables indexées sur le temps, qui sont premièrement proposés par Bowman [183]. Dans cette approche, les opérations des tâches sont affectées aux périodes de temps des machines éligibles. L'application de cette méthode pour le FJSP avec des machines non parallèles est extrêmement limitée dans la littérature. Les autres formulations existantes dans la littérature sont la combinaison hybride des trois approches susmentionnées. Le lecteur intéressé est invité à consulter Demir and İşleyen [180] et Roshanaei et al. [187] pour plus de détails concernant les modèles mathématiques proposés dans la littérature pour les problèmes job-shop et job-shop flexible .

## Modèle avec setups séquence-dépendants

L'examen d'une étude bibliographique révèle que presque tous les modèles proposés dans la littérature pour le FJSP avec setups séquence-dépendants se situent dans la catégorie des modèles basés sur les variables de précédence (voir Imanipour [188] et Low and Wu [189]). Dans cette section, une variable de précédence qui est proposé par Saidi-Mehrabad and Fattahi [165] est présenté. En plus des notations décrites dans la section 2.7, deux variables supplémentaires sont nécessaires pour le modèle suivant.

Dans la formulation mathématique suivante, le setup de l'opération  $j \in J_i$  de la tâche  $i \in N$  sur la machine  $k \in M_{ij}$ , dépend des opérations précédentes réalisées par cette machine, qui est noté par  $s_{ijh_gk}$ , où l'opération  $g \in J_h$  de la tâche  $h \in N$  est l'opération précédente réalisée par la machine  $k \in M_{ij} \cap M_{hg}$ . De plus, une variable binaire  $F_{ijh_gk}$  prend la valeur 1, si l'opération  $g \in J_h$  de la tâche  $h \in N$  est l'opération à traiter immédiatement après la fin de l'opération  $j \in J_i$  de la tâche  $i \in N$  sur la machine  $k \in M_{ij} \cap M_{hg}$ , sinon, elle prend la valeur zéro.

### Objectif

$$\text{Min } C_{max} \quad (2.34)$$

### Avec les contraintes :

$$C_{max} \geq C_{ij}, \quad \forall i \in N, j \in J_i; \quad (2.35)$$

$$S_{ij} + P'_{ijk} \cdot X_{ijk} \leq C_{ij}, \quad \forall i \in N, j \in J_i, k \in M_{ij}; \quad (2.36)$$

$$C_{ij} \leq S_{ij+1}, \quad \forall i \in N, j \in J_i; \quad (2.37)$$

$$S_{ij} + P'_{ijk} + s_{ijh_gk} \leq S_{hg} + B \cdot (1 - F_{ijh_gk}), \quad \forall i \in N, j \in J_i, h \in N, g \in J_h, k \in M_{ij} \cap M_{hg}; \quad (2.38)$$

$$C_{ij} + s_{ijh_gk} \leq S_{ij+1} + B \cdot (1 - F_{hgij+1k}), \quad \forall i \in N, j \in J_i, h \in N, g \in J_h, k \in M_{ij} \cap M_{hg}; \quad (2.39)$$

$$X_{ijk} \leq M_{ijk}, \quad \forall i \in N, j \in J_i, k \in M_{ij}; \quad (2.40)$$

$$\sum_k X_{ijk} = 1, \quad \forall i \in N, j \in J_i; \quad (2.41)$$

$$\sum_i \sum_j F_{ijh_gk} = X_{hgk}, \quad \forall h \in N, g \in J_h, k \in M_{ij} \cap M_{hg}; \quad (2.42)$$

$$\sum_h \sum_g F_{ijh_gk} = X_{ijk}, \quad \forall i \in N, j \in J_i, k \in M_{ij} \cap M_{hg}; \quad (2.43)$$

$$F_{ijijk} = 0, \quad \forall i \in N, j \in J_i, k \in M_{ij}; \quad (2.44)$$

$$S_{ij} \geq 0, C_{ij} \geq 0, \quad \forall i \in N, j \in J_i; \quad (2.45)$$

$$F_{ijh_gk}, X_{ijk} \in \{0, 1\}, \quad \forall i \in N, j \in J_i, h \in N, g \in J_h, k \in M_{ij} \cap M_{hg}; \quad (2.46)$$

La contrainte (2.35) permet de calculer le *makepan*. Les contraintes données par les équations (2.36) et (2.37) garantissent que l'ordre de précedence entre les opérations des tâches est respecté. Les contraintes (2.38) et (2.39) assurent que chaque machine ne peut traiter qu'une seule opération en même temps, et elles garantissent également le respect des setups des machines. La contrainte (2.40) impose que chaque opération ne doit être affectée qu'à l'ensemble des machines éligibles. La contrainte (2.41) stipule qu'une seule machine peut être choisie parmi un ensemble de machines alternatives pour réaliser l'opération  $j \in J_i$  de la tâche  $i \in N$ . Les contraintes (2.42) et (2.43) définissent les permutations circulaires des opérations sur chaque machine. Cela signifie que la contrainte donnée par l'équation (2.42) choisit uniquement l'opération  $g \in J_h$  de la tâche  $h \in N$  qui précède l'opération  $j \in J_i$  de la tâche  $i \in N$  sur la machine  $k \in M_{ij} \cap M_{hg}$ , et la contrainte (2.42) choisit uniquement l'opération  $j \in J_i$  de la tâche  $i \in N$  qui suit immédiatement l'opération  $g \in J_h$  de la tâche  $h \in N$  sur la machine  $k \in M_{ij} \cap M_{hg}$ . Les permutations circulaires des opérations génèrent la séquence de traitement des opérations sur chaque machine.

Le modèle mathématique développé dans cette thèse (voir chapitre 3) pour résoudre le problème étudié appartient à la catégorie des modèles basés sur la précedence et les modèles avec setups séquence-dépendants, en intégrant des contraintes liées au fractionnement des tâches en lots, des contraintes associées à la présence de plusieurs types de ressources et des contraintes relatives au traitement des lots des tâches sur ces différentes ressources.

## 2.8 Schémas de codage et représentation des solutions pour le FJSP

L'algorithme génétique est une des métaheuristiques efficaces et les plus utilisées pour résoudre les problèmes d'ordonnancement de type job-shop flexible (Luo et al. [190]). La représentation ou le codage des solutions est une étape critique dans la mise en œuvre des algorithmes génétiques. Ainsi, la réussite de l'application d'un AG aux problèmes d'ordonnancement dépend principalement de la façon dont les paramètres et les variables du problème sont représentés. Pour utiliser efficacement et optimiser la capacité de l'algorithme génétique à combiner, maintenir et transférer les informations génétiques entre les chaînes de solutions, le codage des solutions doit être correctement conçu (Holland [191]). Parmi les différents types de schémas de codage, ceux basés sur le codage binaire et le codage avec permutation sont les plus utilisés. Comme le montre la Figure 2.10, les chaînes de solutions dans le codage binaire (2.10 (a)) sont constituées de bits 0 ou 1, alors que les chaînes de solutions dans le codage basé sur la permutation (2.10 (b)) sont constituées d'une séquence de nombres. Le premier schéma est le plus fréquemment utilisé, tandis que le second est particulièrement adapté pour le cas des problèmes d'ordonnancement, où la chaîne des nombres représente les séquences des tâches ou des opérations sur les machines.

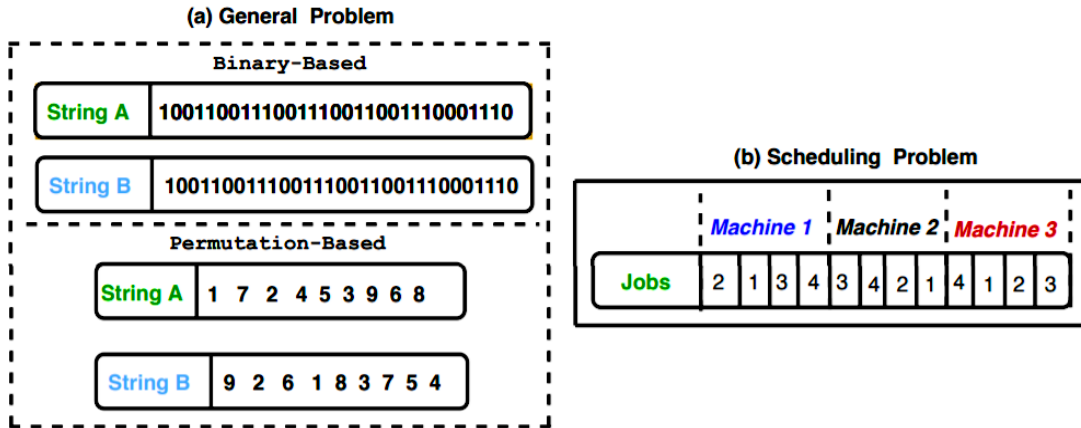


FIGURE 2.10 – Schémas de codage d'un chromosome.

Comme l'indique la Figure 2.10 (b), dans le cadre de l'application des algorithmes génétiques pour la résolution des problèmes d'ordonnancement, la séquence des opérations des tâches sur les machines, est définie par l'ordre des gènes dans les chromosomes. Dans la figure ci-dessus, toutes les tâches passent par toutes les machines, mais dans un ordre différent. Par exemple, la tâche 3 est traitée comme la troisième opération sur la machine 1, la première opération sur la machine 2, et la quatrième opération sur la machine 3. Cependant, les problèmes d'ordonnancement ne suivent pas tous ce schéma de codage. Différents types de codages des solutions ont été proposés dans la littérature. Un examen plus approfondi des travaux antérieurs est présenté dans la sous-section suivante. Ceci permettra de mieux comprendre les limites et les avantages des techniques de codage des solutions adoptées dans la littérature.

## Types de codage des solutions pour le FJSP

Un examen approfondi des techniques existantes de représentation des solutions nous permettrait de mieux comprendre les limites et les avantages des types de codage des solutions existants dans la littérature. Cet examen vise à s'assurer que nous adoptons une procédure efficace et un schéma de codage des solutions plus adaptés pour le problème étudié. Sur la base de nos examen et étude bibliographiques, nous avons classé les schémas de codage des solutions existants en deux groupes : les anciens et les nouveaux schémas de codage des solutions. Les nouveaux types de codage ont été inspirés par Kacem et al. [192] et peuvent être classés en trois sous-groupes principaux appliqués dans différents travaux.

## Schémas de codage OSS

Dans cette méthode de codage, la chaîne des solutions ou des chromosomes est composée de deux chaînes d'affectation et de séquençement. Comme le montre la Figure 2.11, chacune des chaînes d'affectation et de séquençement est codée pour représenter à la fois l'affectation des opérations aux machines, et l'ordre de séquençement des opérations sur chaque machine séparément. Les décisions

d'affectation et d'ordonnancement sont prises séparément (Kacem et al. [192]). Par conséquent, la chaîne de séquençement doit être compatible avec la chaîne d'affectation de sorte que l'affectation des opérations aux machines doit être la même dans les deux chaînes d'affectation et de séquençement. Le schéma de codage OSS (Old Solution-encoding Scheme) présente certaines limites et peut connaître ce que l'on appelle un "blocage du décodage" lors de l'évaluation de la fonction fitness des chaînes de solutions. Le blocage du décodage dans l'ordonnancement se produit lorsque certaines contraintes du problème sont violées, ce qui conduit à un ordonnancement invalide. Un exemple de cas est représenté dans la Table 2.4 et la Figure 2.14 pour expliquer plus en détail le blocage du décodage rencontré avec ce schéma de codage des solutions.

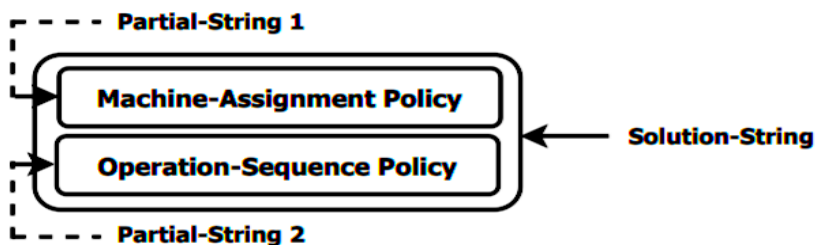


FIGURE 2.11 – Architecture du schéma de codage OSS.

Job	Operations		
	1	2	3
<i>j1</i>	{ <i>m1, m3</i> }	{ <i>m2</i> }	{ <i>m3</i> }
<i>j2</i>	{ <i>m2</i> }	{ <i>m3</i> }	-
<i>j3</i>	{ <i>m3</i> }	{ <i>m1, m2</i> }	{ <i>m2, m3</i> }

TABLE 2.4 – Exemple d'un FJSP pour illustrer le schéma de codage OSS.

À partir de l'exemple ci-dessus dans la Table 2.4, les chaînes d'affectation et de séquençement sont codées par une seule chaîne de solution (Figure 2.12), et le graphe de séquence correspondant est représenté dans la Figure 2.13. La chaîne d'affectation définit l'assignation des opérations des tâches aux machines, tandis que la chaîne de séquençement décrit la séquence des opérations des tâches sur les machines. La flèche orientée dans le graphe définit l'ordre de traitement et le séquençement des opérations liées par des contraintes de précédence sur les machines. Le chemin critique dans le graphe représente le makespan de l'ordonnancement.

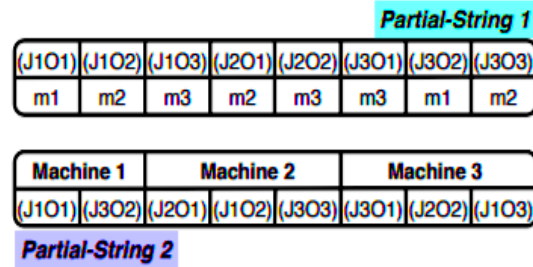


FIGURE 2.12 – Codage d’une solution par des chaînes d’affectation et de séquençement.

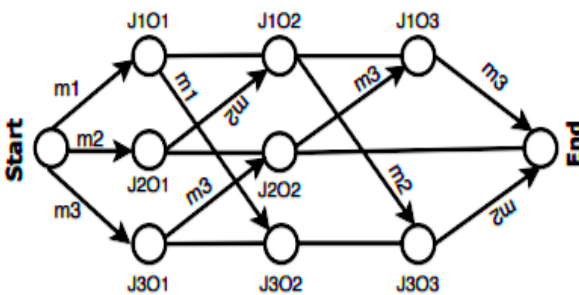


FIGURE 2.13 – Ordre de séquençement réalisable.

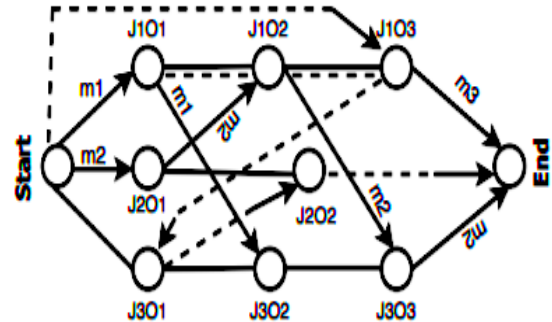


FIGURE 2.14 – Ordre de séquençement non réalisable.

Comme indiqué précédemment, en raison du type de représentation de la solution utilisé, le séquençement correspondant à certaines chaînes de solutions peut aboutir à un blocage. Par exemple, cela peut se produire lorsque les opérateurs génétiques sont appliqués à chaque chaîne d’affectation et de séquençement afin de reproduire une nouvelle chaîne de solution. Un exemple de situation de blocage se produit dans l’exemple précédent, lorsque les affectations sur la machine 3 sont modifiées comme ceci : "M3 : J3O1, J2O2, J1O3" → "M3 : J1O3, J3O1, J2O2". Le blocage du décodage correspondant est représenté dans la Figure 2.14 par des flèches pointillées. Cette modification implique que l’opération 3 de la tâche 1 est réalisée avant l’opération 2 de la tâche 1, ce qui viole les contraintes de précédences entre les opérations des tâches. Ce déficit de cette méthode de représentation des solutions et son besoin d’un mécanisme de réparation l’ont rendue inefficace pour coder des solutions d’un problème d’ordonnancement plus complexe dans un temps de calcul raisonnable (Zhang et al. [193]).

### Schémas de codage NSS

La combinaison des décisions d’affectation et de séquençement lors des processus de reproduction accroît la complexité des systèmes d’ordonnancement et les problèmes correspondants. Par conséquent, le besoin de concevoir de bonnes méthodes de codage des solutions devient indispensable. En raison des limites rencontrées par le schéma de codage des solutions OSS, Kacem et al. [192]



ont développé une nouvelle méthode de représentation des solutions NSS (New Solution-encoding Schemes), à une seule chaîne, capable de coder à la fois les affectations des opérations aux machines et les séquençements des opérations des tâches correspondants. Ce nouveau schéma de codage des solutions peut être classé en trois groupes.

### NSS-Groupe 1

Dans la nouvelle méthode de codage développée par Kacem et al. [192], les deux sous-problèmes d'affectation et de séquençement du FJSP ne doivent pas être codés séparément sur des chaînes de solutions différentes, mais plutôt sur la même chaîne. Ce schéma de représentation des solutions a été utilisé dans plusieurs travaux (Ishikawa et al. [194], Chaudry et al. [195], Demir and İşleyen [196] et Lei [197]) pour résoudre le FJSP. La Figure 2.15 ci-dessous représente une illustration de ce type de codage en utilisant les mêmes paramètres présentés dans la Table 2.4. D'après la Figure 2.15, chaque valeur de gène dans la partie d'affectation des machines représente le numéro de la machine sélectionnée et admissible pour traiter chaque opération, tandis que les valeurs des gènes dans la partie de séquençement des opérations définissent les contraintes de précédence entre les opérations des tâches. De plus, la taille des deux parties de la chaîne de solutions est égale à la somme totale de toutes les opérations des tâches (dans l'exemple de la Table 2.4, 8 opérations au total sont équivalentes à 8 gènes par partie dans la chaîne de solutions). En outre, chaque gène de la partie de séquençement des opérations est couplé avec le gène correspondant dans la partie d'affectation des machines de la chaîne des solutions. Par exemple, J1O1 doit être effectuée par la machine M1, J2O2 par la machine M3, J3O2 par la machine M1, et ainsi de suite.

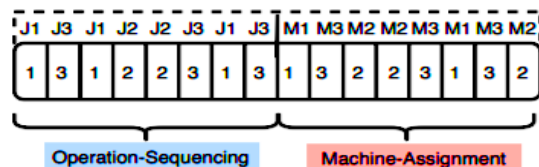


FIGURE 2.15 – Codage de solution basé sur le schéma NSS-Groupe 1.

### NSS-Groupe 2

Comme le schéma de codage NSS-Groupe 1, la méthode de codage NSS-Groupe 2, est décrite par une chaîne de solutions unique, mais avec une représentation différente dans les gènes du chromosome. Les parties de séquençement des opérations et d'affectation des machines sont représentées par des valeurs entières dont la longueur est égale à la somme de toutes les opérations des tâches (voir Figure 2.16). Cette méthode de codage a été appliquée par Gao et al. [198], Gholami and Zandieh [199], Driss et al. [200], Zhang et al. [193], Wang et al. [201] et Teekeng and Thammano [202], pour résoudre le problème FJSP. Concernant la partie d'affectation des machines, chaque valeur de gène est une représentation de la machine éligible choisie pour effectuer l'opération correspondante. En utilisant les mêmes données de la Table 2.4, une représentation des solutions en utilisant ce type de codage, est illustrée dans la Figure 2.16.

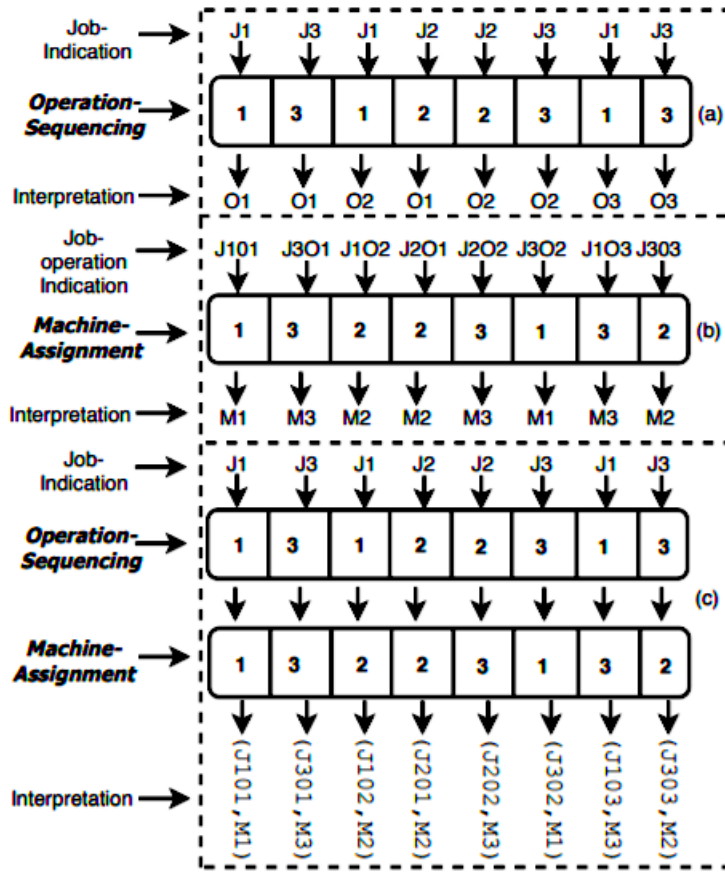


FIGURE 2.16 – Codage de solution basé sur le schéma NSS-Groupe 2.

Concernant la partie permettant de coder le séquençage des opérations des tâches, toutes les opérations sont identifiées par la même représentation ou la même valeur entière, et sont interprétées en fonction du nombre de fois où elles sont répétées dans une chaîne de solutions donnée. Par conséquent, la  $n^{eme}$  répétition d'un numéro de tâche décrit la séquence de la  $n^{eme}$  opération de la tâche. Par exemple, dans la Figure 2.16, les valeurs entières 1 et 3 apparaissent trois fois car les tâches 1 et 3 ont le même nombre d'opérations qui est égal à trois, tandis que la valeur entière 2 apparaît deux fois parce que la tâche 2 n'a que deux opérations. De plus, en parcourant la chaîne de solution de gauche à droite, la première apparition des valeurs entières 1 et 3 indique la première opération de la tâche 1 et 3, alors que la deuxième apparition de la tâche 2 désigne la deuxième opération de la tâche 2. Par conséquent, en lisant le chromosome de gauche à droite dans la Figure 2.16, la chaîne de solution correspondante est décodée comme suit :  $(J1O1, M1) \rightarrow (J3O1, M3) \rightarrow (J1O2, M2) \rightarrow (J2O1, M2) \rightarrow (J2O2, M3) \rightarrow (J3O2, M1) \rightarrow (J1O3, M3) \rightarrow (J3O3, M2)$ .

### NSS-Groupe 3

Contrairement aux schémas de codage des solutions NSS-Groupe 1 et 2, qui intègrent à la fois les décisions d'affectation et de séquençage sur la même chaîne de solutions, cette méthode de

codage semble être un peu plus efficace dans la conception de la méthode de représentation des solutions. Le schéma de codage NSS-Groupe 3 intègre non seulement l'affectation des machines et le séquençement des opérations sur la même chaîne de solutions, mais aussi dans le même gène, ce qui permet de les coder conjointement, à la différence des schémas de codage NSS-Groupe 1 et 2. Ainsi, pour une représentation de l'affectation des machines et le séquençement des opérations, les chaînes de solutions sont codées sous forme de gènes jumeaux ou un n-uplet de gènes en fonction du problème traité. Ce schéma de codage des solutions permet d'accroître l'efficacité des opérateurs génétiques et de diminuer l'utilisation de la mémoire par l'algorithme. Il offre également la possibilité de modéliser des routages alternatifs machine-opération (Al-Hinai and ElMekkawy [203]). Ce type de codage a été utilisé dans plusieurs travaux (Pezzella et al. [204], De Giovanni and Pezzella [205], Defersha and Chen [166], Al-Hinai and ElMekkawy [203] et Rohaninejad et al. [206]) pour résoudre des problèmes de type FJSP. Dans le présent travail, le schéma de codage NSS-Groupe 3 est utilisé pour le problème FJSP-SDST-JS-MTMR. Les sous-sections suivantes présentent des descriptions détaillées avec des exemples pour mieux expliquer l'adaptation de ce schéma de codage des solutions pour le problème étudié.

### Représentation des solutions pour le FJSP-SDST

Dans cette sous-section, une représentation des solutions pour le FJSP-SDST à contrainte de ressource unique basée sur le NSS-Groupe 3 est brièvement présentée. On parle de ressource unique parce que la seule ressource considérée dans ce cas est la "machine". Pour le cas de multi-ressources, le lecteur est invité à consulter Kress and Müller [207], Yazdani et al. [208] et Lei and Guo [209]. Pour le codage des solutions pour le FJSP à contrainte de ressource unique, qui est considéré dans cette étude, Kacem et al. [210], Zhang et al. [193], Gao et al. [198], Pezzella et al. [204], De Giovanni and Pezzella [205], Rohaninejad et al. [206], Rooyani and Defersha [211], ont proposé une représentation des solutions qui code à la fois le séquençement des opérations des tâches et leurs affectations aux machines éligibles. Cette représentation est codée par un gène trip-let  $(j, o, m)$ , désignant l'affectation de la  $o^{eme}$  opération de la tâche  $j$  à la machine qualifiée  $m$ . Une illustration du codage et du décodage chromosomique pour le FJSP-SDST est présentée dans la Figure 2.17, à partir de l'exemple donné dans la Table 2.5, qui est composé de 4 tâches, 4 machines et un maximum de 3 opérations pour chaque tâche. Le symbole "-" signifie que la tâche ne comporte pas l'opération dans la colonne correspondante. Le séquençement des opérations sur les machines se décode en lisant le chromosome de gauche à droite tel que montre la Figure 2.17.

Job	Operations		
	1	2	3
$j1$	{ $m1, m3$ }	{ $m2, m4$ }	-
$j2$	{ $m2$ }	{ $m3$ }	{ $m2, m3$ }
$j3$	{ $m1, m4$ }	{ $m2$ }	-
$j4$	{ $m3, m4$ }	{ $m1, m2$ }	{ $m2, m4$ }

TABLE 2.5 – Exemple de FJSP à contrainte de ressource unique.

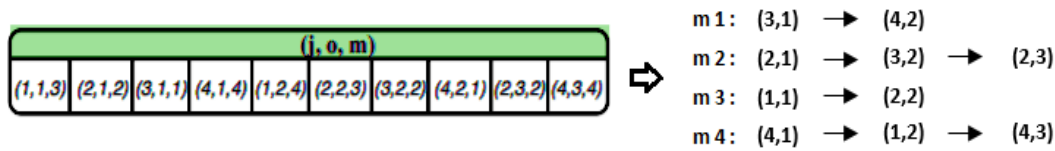


FIGURE 2.17 – Codage et décodage de solution pour le FJSP à contrainte de ressource unique.

Le type de codage adopté dans le présent travail est basé sur le schéma de représentation des solutions utilisé pour le FJSP-SDST, en considérant chaque lot comme une tâche. Dans ce cas, la représentation du chromosome est codée par un gène quadruple  $(i, l, j, k)$ , désignant l'affectation de la  $j^{eme}$  opération du lot  $l$  de la tâche  $i$  à la  $k^{eme}$  machine. Cette représentation est illustrée et expliquée à travers un exemple dans la section 4.2 du chapitre 4.

## 2.9 Conclusion

Dans ce chapitre, un état de l'art sur les différents aspects des problématiques étudiées dans cette thèse a été présenté. L'accent a été mis principalement sur les approches de modélisation et d'optimisation utilisées dans la littérature pour l'intégration des facteurs humains dans la conception des systèmes de production et logistiques. Par la suite, l'étude bibliographique a été orientée sur les problèmes de planification et d'ordonnement des processus de production alimentaire et les problèmes job-shop flexible, ainsi que les méthodes de résolution existantes pour résoudre ces différents problèmes. Comme le montre la revue de la littérature, il n'y a aucun travaux de recherche qui ont abordé le problème de planification et d'ordonnement de la production alimentaire en restauration hospitalière ou collective, en considérant les contraintes et les objectifs visés dans cette étude. Ainsi, les approches de modélisation et de résolution développées dans cette thèse, sont les premières contributions scientifiques permettant de résoudre ce problème. Les chapitres suivants présentent une description du problème étudié, le modèle mathématique et les méthodes de résolutions développés pour le résoudre, ainsi que des applications numériques et des résultats expérimentaux.



## Chapitre 3

# Modélisation mathématique

### 3.1 Introduction

Nous présentons dans ce chapitre l’approche adoptée pour développer un modèle mathématique permettant de représenter, spécifier et résoudre le problème job-shop flexible (FJSP) avec setups séquence-dépendants et fractionnement des tâches en lots en présence de différents types de ressources matérielles (FJSP-SDST-JS-MTMR). Le problème job-shop (JSP) classique est un problème NP-difficile au sens fort (Garey et al. [212]). Le FJSP est une extension du problème JSP puisqu’il nécessite les décisions supplémentaires d’affectation des opérations et de leur séquençement sur les ressources. Par conséquent, le FJSP intègre non seulement toutes les complexités du JSP, mais constitue également un problème plus complexe. On peut donc conclure que le FJSP est également NP-difficile au sens fort (Xia and Wu [213], Fattahi et al. [184]). Dans ce chapitre, une description détaillée du problème étudié est fournie, par la suite, le modèle mathématique développé pour résoudre ce problème est présenté.

### 3.2 Description du problème et notations

Cette section présente une description détaillée du problème étudié dans cette thèse, et les notations utilisées pour le problème FJSP-SDST-JS-MTMR, ainsi que le modèle mathématique développé pour formaliser et résoudre ce problème. Ce modèle se situe dans la catégorie des modèles basés sur les variables de précédences et les modèles avec setups séquence-dépendants avec des caractéristiques particulières liées au fractionnement des tâches en lots et prenant compte des contraintes spécifiques industrielles.

Le problème d’ordonnancement de la production alimentaire porte sur le processus de préparation des plats allant du prétraitement des matières premières jusqu’au refroidissement et le stock des produits finis. La Figure 3.2 présente les différentes étapes du processus de production des repas de la réception des matières premières jusqu’à la distribution des repas aux patients. Dans cette figure, un rectangle correspond à une opération et les zones de stockage sont représentées par des

triangles. Les flux d'aliments, de vaisselle sale et propre sont illustrés par des flèches de différentes couleurs. La flèche en gris représente ce qu'on appelle le circuit court, par lequel passe les produits qui ne passent pas en production, tels que les dessert, les produits laitiers, etc.

Le problème traité dans cette étude peut être décrit par un ensemble de  $N$  tâches indépendantes à planifier dans un système de production. Chaque tâche  $i \in N$  correspond à la préparation d'un plat, qui est caractérisé par un nombre de portions  $Q_i$  (quantité), et un ensemble d'opérations  $J_i$  nécessaires à la préparation du plat, de la matière première jusqu'au produit fini. Pour chaque tâche, une date de fin de production au plus tard  $d_i$  doit être respectée. Chaque tâche peut être fractionnée en plusieurs lots  $L_i$ , de telle sorte que les opérations des lots des tâches puissent être effectuées simultanément ou consécutivement sur les ressources. Cette stratégie est utile lorsque la capacité d'une ressource ne permet pas le traitement de la quantité totale d'une tâche. La Figure 3.1 présente le principe du fractionnement des tâches en lots, ainsi que l'affectation des opérations des lots des tâches et leurs séquencements sur les ressources.

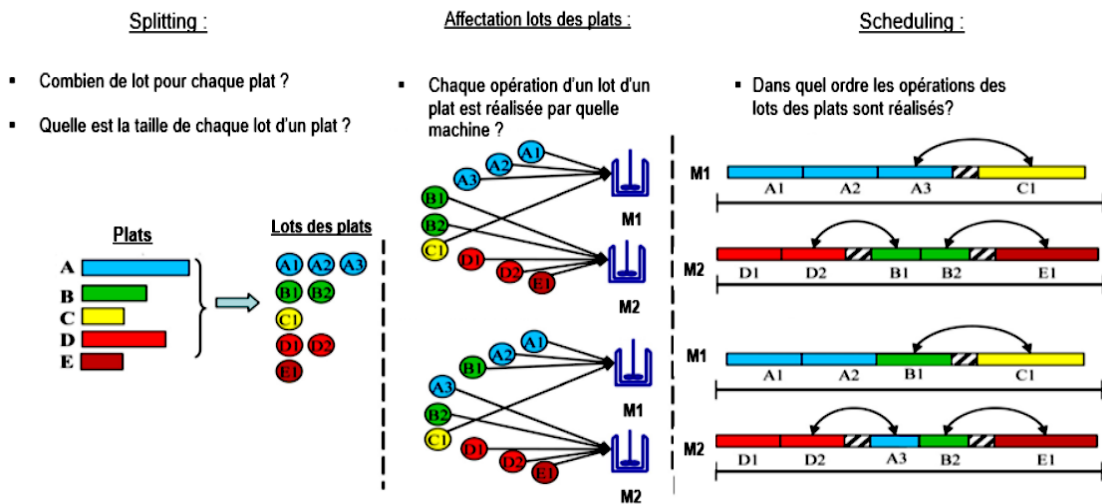


FIGURE 3.1 – Stratégie de fractionnement des tâches (plats) en lots.

Il est important de noter que les tâches n'ont pas les mêmes gammes opératoires correspondants à l'ensemble d'opérations nécessaires pour la préparation des plats. Dans cette étude, nous avons identifié 12 gammes opératoires (Figure 3.3) pour l'ensemble des plats à préparer, et il est possible que plusieurs plats puissent avoir la même gamme opératoire.

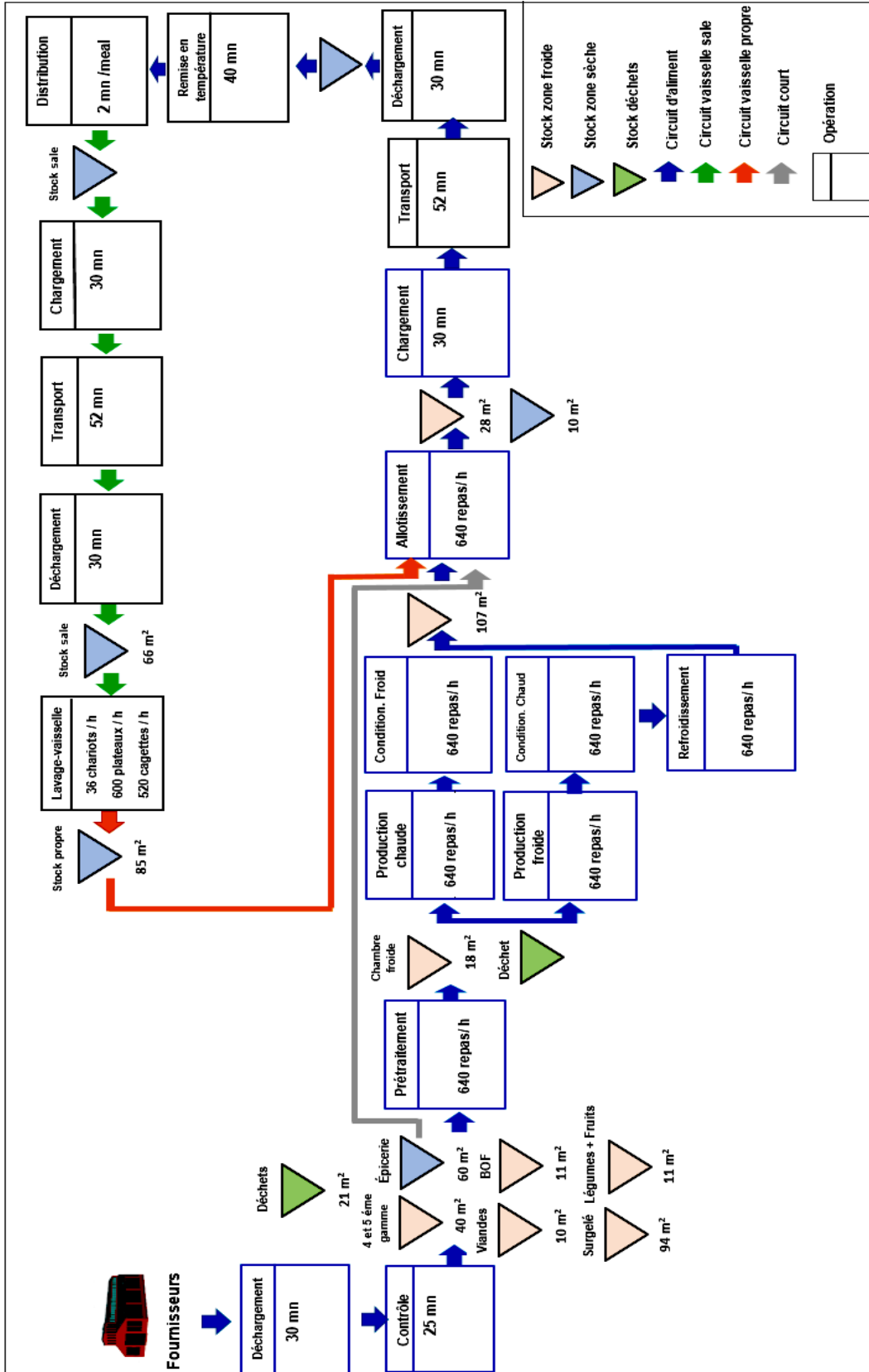


FIGURE 3.2 – Schéma représentatif du processus de fabrication des repas.



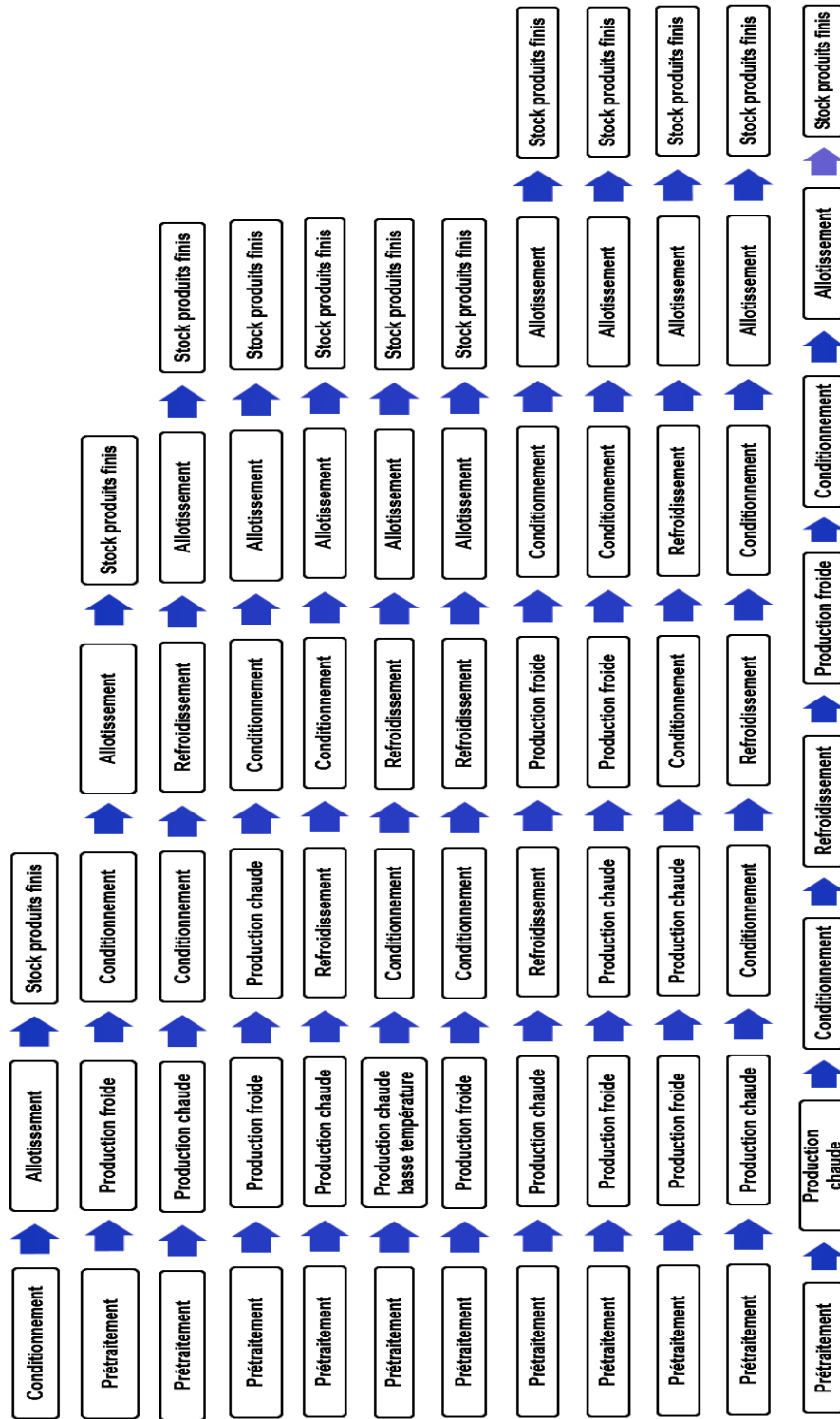


FIGURE 3.3 – Gammes opératoires pour la préparation des plats.

Pour chaque opération d'une gamme opératoire, il existe un ensemble de ressources éligibles pouvant la réaliser. Ces ressources peuvent être classées en trois catégories (Figure 3.4) :

- un ensemble de ressources ayant une capacité d'une portion et qui ne peuvent pas traiter plusieurs tâches en même temps. Cet ensemble représente les ressources pouvant effectuer les opérations du prétraitement et de la production froide.
- un ensemble de ressources dont la capacité est supérieure à une portion, et qui ne peuvent pas traiter plusieurs tâches en même temps, telles que : les fours, les marmites, les sauteuses, etc.
- un ensemble de ressources correspondant aux cellules de refroidissement, ayant une capacité supérieure à une portion et qui peuvent traiter plusieurs tâches en même temps.

Comme le montre la Figure 3.4, les ressources ayant des fonctionnalités communes sont regroupées dans un poste de travail, par exemple, les ressources de cuisson sont groupées dans un poste de production chaude, etc.

Pour chaque ressource, un setup doit être pris en compte qui correspond au temps de préparation de la ressource au début de l'ordonnancement, au temps de changement d'outillages ou au temps de nettoyage de la ressource entre deux opérations consécutives. Il est nécessaire de noter que les setups des ressources dépendent des opérations précédentes. Ces derniers sont notés par  $s_{ijhkg}$ , où l'opération  $j \in J_i$  d'un lot de la tâche  $i \in N$  est l'opération qui précède l'opération  $g \in J_h$  d'un lot de la tâche  $h \in N$  sur la ressource  $k \in M_{ij} \cap M_{hg}$ . Si une opération d'un lot d'une tâche est la première opération à traiter sur une ressource donnée, dans ce cas le setup de la ressource correspond simplement au temps de préparation de la ressource (exp : préchauffage des fours).

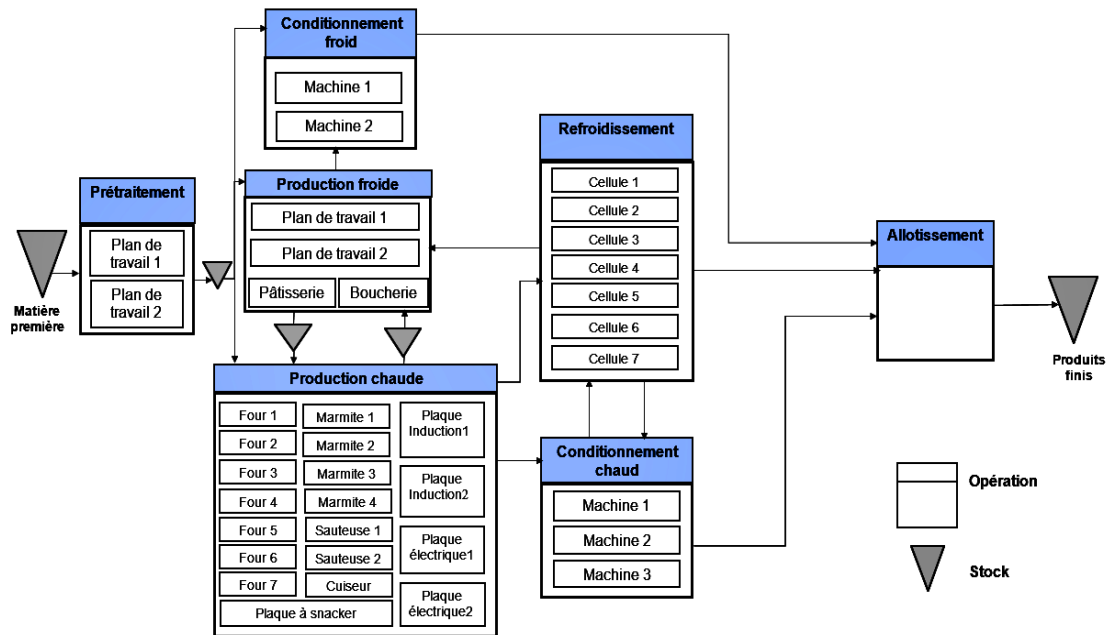


FIGURE 3.4 – Ensemble de ressources disponibles pour la réalisation des opérations des gammes opératoires.

Ce problème est considéré comme un problème de type job-shop flexible avec setups dépendants de la séquence (FJSP-SDST), vu que les tâches n'ont pas le même ordre de traitement sur les ressources (Figure 3.5) et du fait que chaque opération d'une tâche peut être réalisée par une ressource parmi un ensemble de ressources alternatives (Figure 3.6). Il est important de noter que les ressources correspondantes peuvent ne pas être identiques, impliquant des temps de traitement différents selon la ressource choisie.

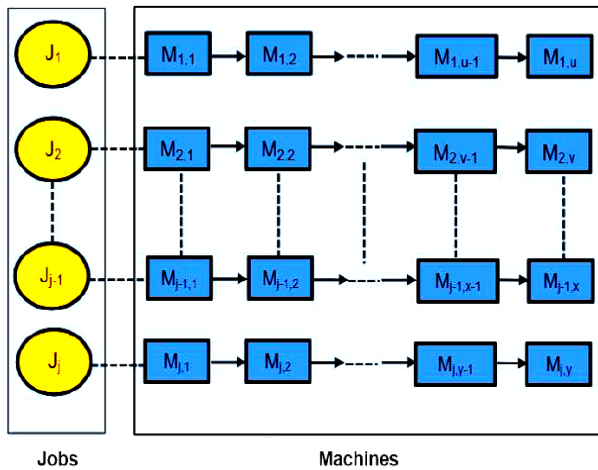


FIGURE 3.5 – Ordre de traitement des tâches sur les ressources.

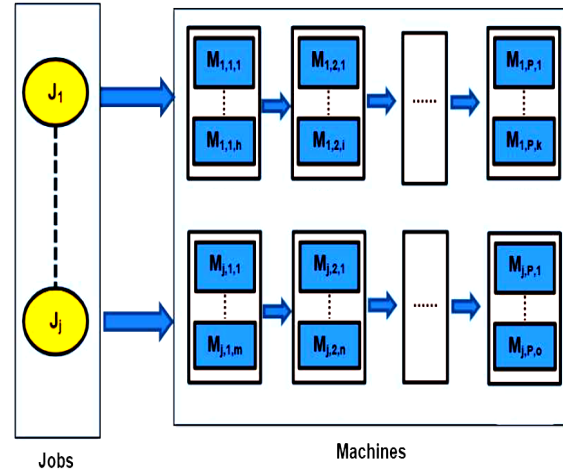


FIGURE 3.6 – Ressources alternatives pour la réalisation des opérations des tâches.

Le critère à optimiser dans cette étude consiste à minimiser les temps de séjour des tâches dans le système de production. Le choix de ce critère est basé sur le fait que dans un processus alimentaire nous devons assurer le respect de la chaîne froide à chaque étape du cycle de vie du produit, qui vise à maintenir en permanence une basse température (positive ou négative selon le type de produit) pour assurer le maintien de toutes les qualités (hygiéniques, nutritionnelles et gustatives) des aliments.

Comme le montre la Figure (3.7), le problème d'ordonnancement étudié consiste à :

- (i) affecter chaque opération d'un lot d'une tâche à l'une de ses ressources alternatives,
- (ii) ordonnancer les opérations des lots des tâches sur les ressources,
- (iii) déterminer les dates de début et de fin de traitement des opérations des lots des tâches et les dates de fin de traitement des tâches.

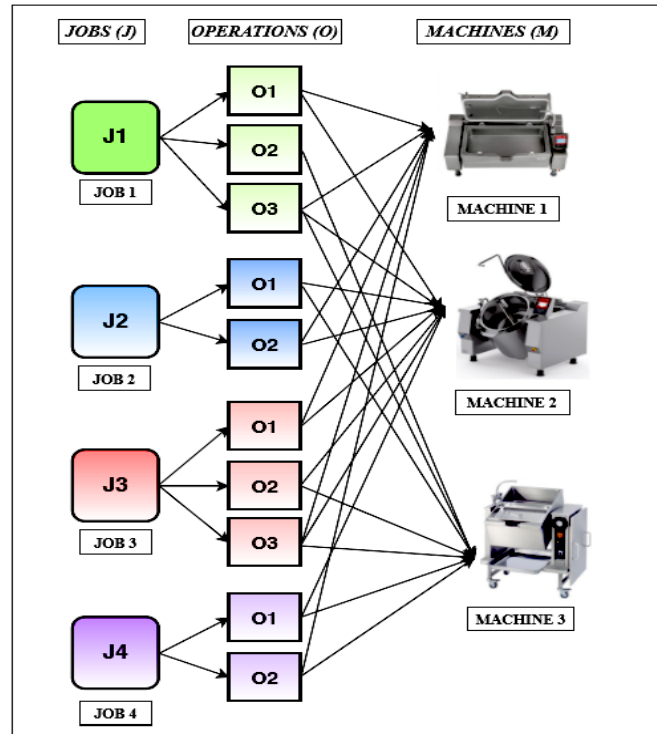


FIGURE 3.7 – Exemple basique du problème étudié.

La Figure (3.7) présente un exemple du problème traité, avec 4 tâches et 3 ressources, où chaque tâche est composée d'un seul lot. Les lots des tâches sont constitués de plusieurs opérations qui doivent être exécutées dans un ordre prédéfini. Chaque opération doit être réalisée par une seule ressource éligible et par un nombre connu et prédéfini d'opérateurs. Nous introduisons par la suite, les hypothèses considérées dans cette étude, ainsi que des notations supplémentaires et nous présentons une formulation de programmation linéaire en nombres entiers mixtes (MILP) pour le FJSP-SDST-JS-MTMR.

### 3.2.1 Hypothèses

Le problème d'ordonnancement traité dans cette étude hérite des principales hypothèses du problème d'ordonnancement job shop flexible avec setups séquence-dépendants, en plus de certaines caractéristiques dues au fractionnement des tâches et au regroupement des lots :

- les tâches et les ressources sont disponibles à l'instant  $t$  égal à zéro.
- les tâches sont indépendantes les unes des autres,
- chaque tâche a une date de fin de production au plus tard à respecter,
- une tâche peut être fractionnée en plusieurs lots,
- le nombre de lots pour chaque tâche est prédéfini,
- les tailles des lots des tâches (nombre de portions des lots) sont discrètes,

- le nombre de lots des tâches ainsi que leurs tailles sont constants pour toutes les opérations du processus de production,
- les lots des tâches peuvent être regroupés sur les ressources pour être traités en même temps,
- à chaque lot d'une tâche est associé un ensemble d'opérations qui doivent être réalisées consécutivement selon une séquence prédéfinie (contraintes de précédence entre les opérations),
- chaque opération d'un lot d'une tâche doit être affectée à une seule ressource éligible,
- chaque opération d'un lot d'une tâche a un temps de traitement donné qui dépend de la ressource choisie,
- la préemption des opérations des lots des tâches n'est pas autorisée, c'est-à-dire que le traitement des opérations ne peut pas être interrompu,
- les temps d'attente entre les opérations consécutives des tâches doivent être minimisés,
- les ressources sont indépendantes,
- une ressource peut traiter au plus une opération d'une tâche en même temps (contrainte de capacités des ressources),
- les setups des ressources dépendent de la séquence des opérations des lots des tâches,
- chaque ressource a une fenêtre horaire de disponibilité donnée qui doit être respectée,
- les pannes des ressources ne sont pas prises en considération,
- le nombre d'opérateur affecté à chaque opération est connu et défini au préalable.

Compte tenu de ces hypothèses, l'objectif est de trouver un ordonnancement définissant l'affectation et le séquençement des triplets (tâche, lot, opération) sur les ressources, de manière à ce que :

- la demande de chaque plat soit satisfaite ;
- les différentes contraintes du problème soient respectées ;
- les temps de séjour des tâches dans le système de production soient minimisés.

### 3.2.2 Notations

- $N$  : ensemble des tâches représentant les plats à préparer, où  $n = |N|$  et  $\{0, n + 1\}$  sont deux tâches fictives correspondant respectivement à la préparation des ressources au début de l'ordonnancement et à leur nettoyage à la fin de l'ordonnancement ;
- $J_i$  : ensemble d'opérations des lots de la tâche  $i \in N$ , tel que l'opération  $j \in J_i$  est effectuée avant l'opération  $j + 1$  et  $|J_0| = |J_{n+1}| = 1$  ;
- $Q_i$  : nombre de portions de la tâche  $i \in N$  ;
- $q_i$  : nombre de portions de chaque lot de la tâche  $i \in N$  ;
- $L_i$  : ensemble des lots de la tâche  $i \in N$ , avec  $|L_0| = |L_{n+1}| = 1$  et  $l_i = |L_i|$  tel que  $l_i = \lceil \frac{Q_i}{q_i} \rceil$  ;
- $d_i$  : date de fin de production au plus tard de la tâche  $i \in N$  ;

- $M$  : ensemble de ressources composé de plusieurs sous-ensembles, où  $m = |M|$  ;
- $M_{ij} \subset M$  : ensemble des ressources pouvant réaliser l'opération  $j \in J_i$  des lots de la tâche  $i \in N$  ;
- $R_k$  : capacité maximale en nombre de portions de la ressource  $k \in M$  ;
- $M_1 \subset M$  : ensemble de ressources qui ont une capacité d'une portion et qui ne peuvent pas traiter plusieurs tâches en même temps ;
- $M_2 \subset M$  : ensemble de ressources qui ont une capacité supérieure à une portion et qui ne peuvent pas traiter plusieurs tâches en même temps ;
- $M_3 \subset M$  : ensemble de ressources qui ont une capacité supérieure à une portion et qui peuvent traiter plusieurs tâches en même temps ;
- $P'_{ijk}$  : durée de traitement unitaire de l'opération  $j \in J_i$  des lots de la tâche  $i \in N$  sur la ressource  $k \in M_1$  ;
- $P_{ijk}$  : durée de traitement de l'opération  $j \in J_i$  des lots de la tâche  $i \in N$  sur la ressource  $k \in M_2 \cup M_3$  ;
- $s_{ijhgk}$  : setup de la ressource  $k \in M_{ij} \cap M_{hg}$ , si l'opération  $j \in J_i$  de la tâche  $i \in N$  précède directement l'opération  $g \in J_h$  de la tâche  $h \in N$  sur la ressource  $k \in M_{ij} \cap M_{hg}$  ;
- $T_k$  : temps de préparation de la ressource  $k \in M$  au début de l'ordonnancement ;
- $T'_k$  : temps de nettoyage de la ressource  $k \in M$  à la fin de l'ordonnancement ;
- $[A_k, Y_k]$  : fenêtre horaire de disponibilité de la ressource  $k \in M$  ;
- $B$  : entier très grand.

### 3.2.3 Variables de décision

- $X_{iljk}$  : variable binaire, égale à 1, si l'opération  $j \in J_i$  du lot  $l \in L_i$  de la tâche  $i \in N$  est affectée à la ressource  $k \in M_{ij}$ , 0 sinon ;
- $F_{iljhl'gk}$  : variable binaire, égale à 1, si l'opération  $j \in J_i$  du lot  $l \in L_i$  de la tâche  $i \in N$  précède directement l'opération  $g \in J_h$  du lot  $l' \in L_h$  de la tâche  $h \in N$  sur la ressource  $k \in M_{ij} \cap M_{hg}$ , 0 sinon ;
- $Z_{ill'jk}$  : variable binaire, égale à 1, si l'opération  $j \in J_i$  du lot  $l \in L_i$  de la tâche  $i \in N$  commence et se termine en même temps que l'opération  $j \in J_i$  du lot  $l' \in L_i$  de la tâche  $i \in N$  sur la ressource  $k \in M_{ij}$ , 0 sinon ;
- $S_{iljk}$  : date de début de traitement de l'opération  $j \in J_i$  du lot  $l \in L_i$  de la tâche  $i \in N$  sur la ressource  $k \in M_{ij}$  ;
- $C_{iljk}$  : date de fin de traitement de l'opération  $j \in J_i$  du lot  $l \in L_i$  de la tâche  $i \in N$  sur la ressource  $k \in M_{ij}$  ;
- $C_i$  : date de fin de traitement de la tâche  $i \in N$ .

### 3.3 Modèle mathématique pour le FJSP-SDST-JS-MTMR

Objectif

$$\text{Min} \sum_{i \in N} C_i \quad (3.1)$$

L'équation (3.1) représente la fonction objectif consistant à minimiser les temps de présence des tâches dans le système de production, qui est défini par la somme des dates de fin de traitement de toutes les tâches.

Avec les contraintes :

$$C_i \geq \sum_{k \in M_{ij}} C_{iljk}; \quad \forall i \in N, l \in L_i, j \in J_i \quad (3.2)$$

La contrainte donnée par l'équation (3.2) permet de calculer les dates de fin de traitement des tâches.

$$S_{iljk} + C_{iljk} \leq B \cdot X_{iljk}, \quad \forall i \in N, l \in L_i, j \in J_i, k \in M_{ij}; \quad (3.3)$$

Il est important de noter que dans la contrainte donnée par l'équation (3.3), les variables  $S_{iljk}$  et  $C_{iljk}$  sont égales à zéro si la ressource  $k \in M_{ij}$  n'est pas choisie pour traiter l'opération  $j \in J_i$  du lot  $l \in L_i$  de la tâche  $i \in N$ .

$$C_{iljk} - S_{iljk} \geq P'_{ijk} * Q_i - B \cdot (1 - X_{iljk}), \quad \forall i \in N, l \in L_i, j \in J_i, k \in M_1 \quad (3.4)$$

$$C_{iljk} - S_{iljk} \geq P_{ijk} - B \cdot (1 - X_{iljk}), \quad \forall i \in N, l \in L_i, j \in J_i, k \in M_2 \cup M_3 \quad (3.5)$$

Les contraintes (3.4) et (3.5) permettent ensemble de calculer les variables  $S_{iljk}$  et  $C_{iljk}$  si la ressource  $k \in M_{ij}$  est choisie pour traiter l'opération  $j \in J_i$  du lot  $l \in L_i$  de la tâche  $i \in N$  (i.e,  $X_{iljk}$  égale à 1). Ces contraintes permettent également d'assurer le respect des durées de traitement des opérations des lots des tâches. Les temps de traitement des opérations ne dépendent pas des quantités des tâches pour les ressources de type  $M_2$  et  $M_3$  (équation 3.4), mais ils dépendent des quantités des tâches pour l'ensemble des ressources de type  $M_1$  (équation 3.5).

$$S_{hl'gk} \geq C_{iljk} + s_{ijh'gk} - B \cdot (1 - F_{iljh'gk}), \quad \forall i \in N, l \in L_i, j \in J_i, h \in N, l' \in L_h, g \in J_h, \quad (3.6)$$

$$k \in M_{ij} \cap M_{h'g} \setminus M_3;$$

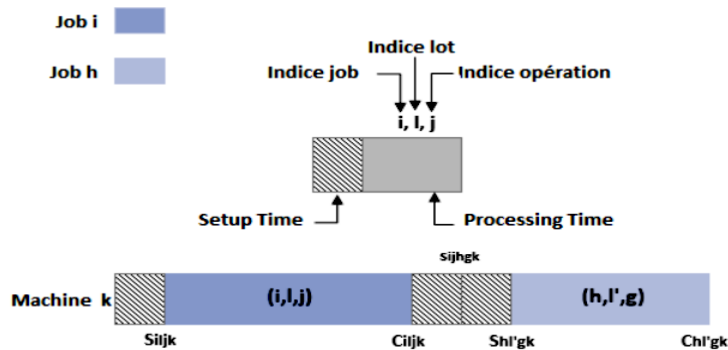


FIGURE 3.8 – Temps de setup des ressources dépendant de la séquence des opérations.

La contrainte dans l'équation (3.6) impose le respect des temps de setup des ressources entre les opérations consécutives des tâches (Figure 3.8).

$$S_{il'jk} \geq C_{iljk} + s_{ijijk} - B \cdot (1 - F_{iljl'jk}) - B \cdot Z_{ill'jk}, \forall i \in N, l, l' \in L_i, j \in J_i, k \in M_{ij} \cap M_{hg} \quad (3.7)$$

La contrainte (3.7) permet de désactiver la contrainte donnée par l'équation (3.6) si deux lots différents de la même tâche sont traités en même temps par la même ressource (Figure 3.9).

$$S_{iljk} - S_{il'jk} \leq B \cdot (1 - Z_{ill'jk}), \forall i \in N, l, l' \in L_i, j \in J_i, k \in M_2 \cup M_3; \quad (3.8)$$

$$C_{iljk} - C_{il'jk} \leq B \cdot (1 - Z_{ill'jk}), \forall i \in N, l, l' \in L_i, j \in J_i, k \in M_2 \cup M_3; \quad (3.9)$$

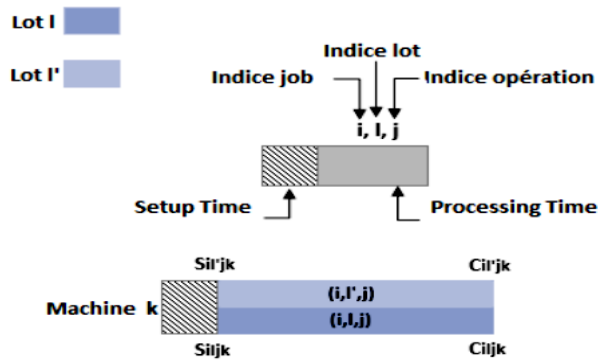


FIGURE 3.9 – Traitement de plusieurs lots en même temps par la même ressource.

Les contraintes dans les équations (3.8) et (3.9) imposent que si deux opérations de deux lots différents de la même tâche sont affectées en même temps à une ressource de type  $M_2$  ou  $M_3$ , elles doivent avoir les mêmes dates de début et de fin de traitement respectivement (Figure 3.9).

$$\sum_{h \in N \setminus \{0\}} \sum_{l' \in L_h} \sum_{g \in J_h} F_{iljh'l'gk} = 1, \forall i \in N \setminus \{n+1\}, l \in L_i, j \in J_i, k \in M_{ij} \cap M_{hg}; \quad (3.10)$$

$$\sum_{i \in N \setminus \{n+1\}} \sum_{l \in L_i} \sum_{j \in J_i} F_{iljhl'gk} = 1, \forall h \in N \setminus \{0\}, l' \in L_h, g \in J_h, k \in M_{ij} \cap M_{hg}; \quad (3.11)$$

La contrainte (3.10) assure qu'une seule opération suit directement une opération d'un lot d'une tâche sur une ressource. La contrainte (3.11) garantit qu'une seule opération précède directement une opération d'un lot d'une tâche sur une ressource.

$$\sum_{k \in M_{ij}} S_{iljk} - \sum_{k' \in M_{ij-1}} C_{ilj-1k'} \geq 0, \forall i \in N, l \in L_i, j \in J_i; \quad (3.12)$$

L'équation (3.12) modélise les relations de précédence entre les opérations consécutives des lots des tâches (Figure 3.10).



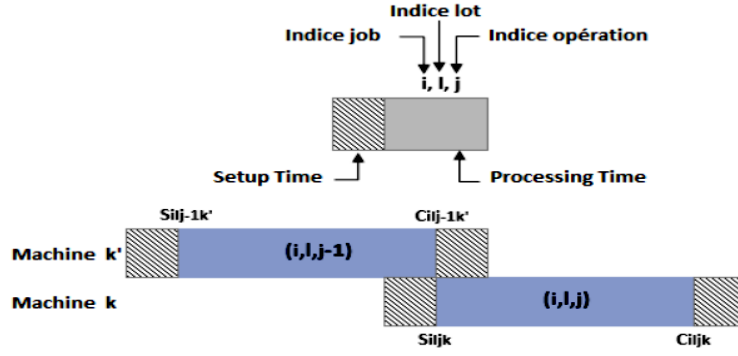


FIGURE 3.10 – Précédence entre les opérations des lots des tâches.

$$\sum_{k \in M_{ij}} X_{iljk} = 1, \quad \forall i \in N, l \in L_i, j \in J_i; \quad (3.13)$$

La contrainte (3.13) impose que chaque opération d'un lot d'une tâche est affectée à une seule ressource.

$$C_i \leq d_i, \quad \forall i \in N; \quad (3.14)$$

La contrainte dans l'équation (3.14) permet de modéliser le respect des dates de fin de production au plus tard pour chaque tâche.

$$\sum_{l, l' \in L_i} q_i \cdot Z_{ill'jk} \leq R_k, \quad \forall i \in N, j \in J_i, k \in M_2 \cup M_3; \quad (3.15)$$

La contrainte (3.15) assure que les capacités des ressources en nombre de portions sont respectées.

$$S_{iljk} \geq A_k + T_k, \quad \forall i \in N, l \in L_i, j \in J_i, k \in M_{ij}; \quad (3.16)$$

$$C_{iljk} \leq T'_k + Y_k, \quad \forall i \in N, l \in L_i, j \in J_i, k \in M_{ij}; \quad (3.17)$$

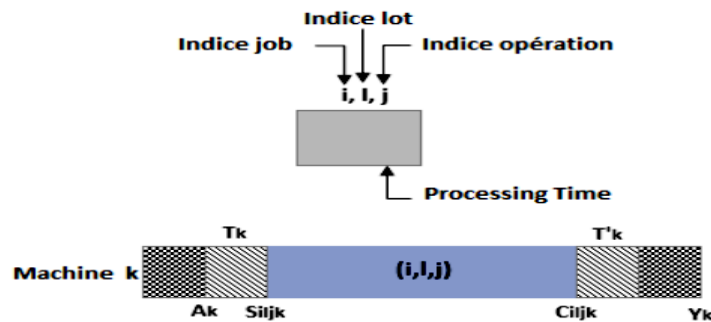


FIGURE 3.11 – Fenêtres horaires de disponibilité des ressources.

Les contraintes données par les équations (3.16) et (3.17) garantissent le respect des fenêtres horaires de disponibilité des ressources, et elles tiennent également compte des temps de préparation des ressources au début de l'ordonnancement et des temps de leur nettoyage à la fin de l'ordonnancement (Figure 3.11).

$$Z_{ill'jk} = 0, \forall i \in N, l, l' \in L_i, j \in J_i, k \in M_1; \quad (3.18)$$

La contrainte (3.18) force la variable  $Z_{ill'jk}$  à prendre la valeur zéro, pour l'ensemble des ressources de type  $M_1$ .

$$S_{iljk} \geq 0, C_{iljk} \geq 0, C_i \geq 0, \forall i \in N, l \in L_i, j \in J_i, k \in M_{ij}; \quad (3.19)$$

L'équation (3.19) définit les domaines des variables de décision réelles.

$$X_{iljk} \in \{0, 1\}, \forall i \in N, l \in L_i, j \in J_i, k \in M_{ij}; \quad (3.20)$$

$$Z_{ill'jk} \in \{0, 1\}, \forall i \in N, l, l' \in L_i, j \in J_i, k \in M_{ij}; \quad (3.21)$$

$$F_{iljhl'gk} \in \{0, 1\}, \forall i \in N, l \in L_i, j \in J_i, h \in N, l' \in L_h, g \in J_h, k \in M_{ij} \cap M_{hg}. \quad (3.22)$$

Enfin, les équations (3.20), (3.21) et (3.22) définissent les domaines des variables de décision binaires.

### 3.4 Résultats d'implémentation du modèle mathématique

Le modèle mathématique présenté précédemment a été codé en langage de programmation Java Eclipse IDE 2019 en utilisant la bibliothèque Cplex du solveur d'optimisation ILOG CPLEX 12.9 pour le résoudre. Ce modèle a été testé sur au total 150 instances de plusieurs types : instances réelles du CHT, instances générées aléatoirement de type CHT, instances générées aléatoirement de petites et de grandes tailles et des instances adaptées de la littérature (Azzouz et al. [214], Bagheri et al. [168], Pezzella et al. [204], Pezzella et al. [204], Lee et al. [178], Mousakhani [169], Sriboonchandr et al. [215]).

Les instances réelles du CHT ont été construites après avoir collecté les données nécessaires en temps réel et chronométré les durées de traitement des opérations des plats des exemples de journées de production (exp : instance avec 82 plats, 370 opérations et 29 machines, voir Annexe A.22). À partir de ces instances, plusieurs instances de petites tailles ont été construites en augmentant à chaque fois le nombre de tâches, de lots et d'opérations pour voir à partir de quel nombre de tâches, de lots et d'opérations le modèle mathématique n'est pas en mesure de trouver des solutions en un temps de résolution raisonnable. Table 3.5 présente les résultats de calcul du modèle mathématique sur ce type d'instances.

Les instances générées aléatoirement du type CHT ont été construites à partir des données (telles que : le nombre de machines, les dates d'échéance des tâches, fenêtres temporelles de disponibilité des machines) issues des instances réelles du CHT. Les autres paramètres de ces instances (Table

3.1) ainsi que les paramètres des instances générées aléatoirement (Table 3.2), ont été obtenus à partir des lois de distribution uniforme  $\mathcal{U}(a, b)$ . Les résultats de calcul du modèle mathématique sur ces différents types d'instances sont présentés dans les Table 3.3, 3.4 et 3.6.

Pour adapter les instances de la littérature au problème étudié, les données manquantes, telles que : les quantités des plats, les dates d'échéance des tâches, les capacités des ressources, et les fenêtres temporelles de disponibilité des ressources, ont été générées aléatoirement selon des lois de distribution uniforme en tenant compte des données sur les temps de traitement des opérations et les temps de setups des ressources données dans ces instances. La Table 3.7 présente les résultats du modèle mathématique sur quelques instances adaptées de la littérature.

Paramètre	Loi de distribution
$n$	$\mathcal{U}(50, 120)$
$ J_i $	$\mathcal{U}(2, 8)$
$ L_i $	$\mathcal{U}(1, 10)$
$Q_i$	$\mathcal{U}(1, 2500)$
$d_i$	$\mathcal{U}(8.00, 14.5)$
$R_k$	$\mathcal{U}(50, 1000)$
$P_{ijk}$	$\mathcal{U}(0.016, 3.00)$
$s_{ijh gk}$	$\mathcal{U}(0.0, 0.33)$
$T_k$	$\mathcal{U}(0.0, 0.5)$
$T'_k$	$\mathcal{U}(0.0, 1.5)$

TABLE 3.1 – Paramètres des instances générées aléatoirement de type CHT.

Paramètre	Loi de distribution
$m$	$\mathcal{U}(3, 35)$
$n$	$\mathcal{U}(3, 100)$
$ J_i $	$\mathcal{U}(2, 10)$
$ L_i $	$\mathcal{U}(1, 12)$
$Q_i$	$\mathcal{U}(1, 2800)$
$q_i$	$\mathcal{U}(1, 234)$
$d_i$	$\mathcal{U}(7.0, 17.0)$
$R_k$	$\mathcal{U}(20, 1000)$
$P_{ijk}$	$\mathcal{U}(0.016, 4.00)$
$s_{ijh gk}$	$\mathcal{U}(0.0, 0.5)$
$T_k$	$\mathcal{U}(0.0, 1.0)$
$T'_k$	$\mathcal{U}(0.0, 2.0)$
$A_k$	$\mathcal{U}(0.0, 7.0)$
$Y_k$	$\mathcal{U}(0.0, 17.0)$

TABLE 3.2 – Paramètres des instances générées aléatoirement.

JB : nombre de tâches, LO : nombre de lots, OP : nombre d'opérations, MA : nombre de machines, Temps : temps d'exécution du modèle mathématique.

JB	LO	OP	MA	$\sum C_i$	Temps
110	110	402	29	-	> 3 h
100	100	342	29	-	> 3 h
90	90	324	29	-	> 3 h
80	80	286	29	-	> 3 h
60	60	200	29	-	> 3 h
50	50	173	29	-	> 3 h
20	20	74	29	-	> 3 h
15	15	59	29	-	> 3 h
10	10	31	29	-	> 3 h
9	9	34	29	-	> 3 h

TABLE 3.3 – Résultats du MILP sur des instances générées aléatoirement du type CHT.

JB	LO	OP	MA	$\sum C_i$	Temps
3	12	11	6	117	16 sec
3	8	13	6	85	24 sec
3	10	8	6	45	10 sec
3	11	11	6	55	20 sec
3	12	12	6	117	104 sec
3	11	13	6	78	30 sec
3	10	12	6	88	172 sec
3	10	13	6	103	240 sec
3	10	10	6	76	28 sec
3	8	9	6	44	24 sec

TABLE 3.4 – Résultats du MILP sur des instances générées aléatoirement de petites tailles.

JB	LO	OP	MA	$\sum C_i$	Temps
2	2	10	29	15.3 h	2 sec
3	3	15	29	24.4 h	4 sec
4	4	20	29	32.8 h	120 sec
5	5	24	29	39.9 h	240 sec
6	6	29	29	49.2 h	1200 sec
7	7	34	29	57.6 h	2700 sec
8	10	39	29	69.4 h	9000 sec
9	11	44	29	-	> 3 h
10	12	48	29	-	> 3 h
20	22	93	29	-	> 3 h
30	32	138	29	-	> 3 h
40	42	179	29	-	> 3 h
50	58	227	29	-	> 3 h
60	68	271	29	-	> 3 h
70	78	315	29	-	> 3 h
82	92	370	29	-	> 3 h

TABLE 3.5 – Résultats du MILP sur des instances réelles du CHT.

JB	LO	OP	MA	$\sum C_i$	Temps
10	10	132	6	-	> 3 h
15	15	168	7	-	> 3 h
20	20	146	8	-	> 3 h
25	25	154	9	-	> 3 h
30	30	151	10	-	> 3 h
35	35	149	11	-	> 3 h
40	40	179	12	-	> 3 h
45	45	221	13	-	> 3 h
50	50	191	14	-	> 3 h
55	55	205	15	-	> 3 h
60	60	195	16	-	> 3 h
65	65	201	17	-	> 3 h
70	70	256	18	-	> 3 h
75	75	258	19	-	> 3 h
80	80	300	20	-	> 3 h
85	96	384	25	-	> 3 h

TABLE 3.6 – Résultats du MILP sur des instances générées aléatoirement de grandes tailles.

Instance	Nb tâches	Nb lots	Nb opérations	Nb machines	$\sum C_i$	Temps
Azzouz et al. [214]	3	3	11	3	74	8 sec
Bagheri et al. [168]	3	3	11	3	68	6 sec
Pezzella et al. [204]	3	3	10	4	33	7 sec
Nouri et al. [216]	3	3	9	5	31	10 sec
Lee et al. [178]	3	3	22	5	102	92 sec
Mousakhani [169]	4	4	12	3	101	9 sec
Sriboonchandr et al. [215]	4	4	14	5	53	12 sec

TABLE 3.7 – Résultats du MILP sur des instances adaptées de la littérature.

### 3.5 Discussion des résultats expérimentaux

D'après les résultats du modèle mathématique présentés dans les tables précédentes (Tables 3.3, 3.4, 3.5, 3.6 et 3.7) sur des instances de différents types et tailles, nous observons que le modèle mathématique trouve rapidement des solutions pour les instances de petites tailles avec moins de 8 tâches, 10 lots, 39 opérations et 29 machines. Les temps d'exécution du modèle mathématique sur les différentes instances testées varient en fonction de leur taille et leur type. Il est important de noter que le temps d'exécution est donné uniquement pour les instances où les solutions optimales

sont obtenues. Dans le cas contraire, la barre "-" signifie que la solution optimale n'a pas été trouvée après 3 heures d'exécution. Les résultats de la mise en œuvre du modèle mathématique développé sur des instances de différents types et tailles montrent les limites d'une résolution exacte du problème d'ordonnancement étudié.

### 3.6 Conclusion

Dans ce chapitre, nous nous sommes intéressés particulièrement à la modélisation mathématique permettant une résolution exacte pour le problème FJSP-SDST-JS-MTMR. Nous avons développé une formulation mathématique permettant de modéliser le problème traité. Le modèle mathématique proposé se situe dans la catégorie des modèles basés sur les variables de précédences et les modèles avec setups séquence-dépendants avec des caractéristiques liées au fractionnement des tâches et au regroupement des lots, et intégrant des contraintes spécifiques industrielles. Les résultats de calcul du modèle mathématique sur des instances réelles du CHT, auxquelles nous nous sommes particulièrement intéressés, ont montré que ce dernier permet de trouver des solutions réalisables en moins de 3 h d'exécution pour les instances de petites tailles avec moins de 8 tâches, 10 lots, 39 opérations et 29 machines. Les temps d'exécution du modèle mathématique varient en fonction du nombre des tâches, des lots, des opérations et des machines. Les résultats de calcul du modèle mathématique développé sur différents types d'instances montrent les limites d'une résolution exacte du problème d'ordonnancement étudié. Les résultats de notre étude ont permis d'apporter des contributions et ont fait l'objet des publications scientifiques (Abderrabi et al. [217], Abderrabi et al. [218] et Abderrabi et al. [219]) portant sur la modélisation et la résolution exacte de ce nouveau problème. Les temps de résolution importants du modèle mathématique et les difficultés liées à la résolution des instances de grandes tailles nous ont amené à développer différentes méthodes hybrides et métaheuristiques qui font l'objet du prochain chapitre.

## Chapitre 4

# Méthodes d'optimisation

### 4.1 Introduction

L'organisation de la production dans les systèmes de fabrication est confrontée au défi de produire des biens de bonne qualité, de manière fiable et dans les délais. Pour atteindre ces objectifs, une organisation de la production repose couramment sur la mise en œuvre des outils d'ordonnancement, ce qui constitue un des volets les plus importants pour une meilleure organisation des activités dans les systèmes de production, dont certaines peuvent être complexes. Les problèmes d'ordonnancement tels que le job-shop flexible avec setups séquence-dépendants et fractionnement des tâches en lots en présence de différents types de ressources matérielles (FJSP-SDST-JS-MTMR), qui reflète certaines de ces complexités de la vie réelle, ne peuvent pas être résolus de manière optimale avec des méthodes exactes dans un temps de calcul raisonnable, en raison de la complexité du problème. Par conséquent, l'application des algorithmes métaheuristiques tels que les algorithmes génétiques, qui sont capables de fournir de bonnes solutions avec moins de temps de calcul, devient de plus en plus importante et indispensable. Pour résoudre efficacement le problème traité dans cette étude, des approches de résolution par algorithme génétique (AG) et algorithme de recherche locale itérative (ILS) sont développées. Le présent chapitre est consacré sur le fonctionnement des AGs et des ILSs et sur une description détaillée de l'architecture de ces métaheuristiques pour le problème étudié.

Les espaces de recherche dans les algorithmes évolutionnaires représentent un ensemble de solutions qui peuvent être parcourues par les algorithmes lors d'un processus de recherche (Bayat Movahed [220]). L'algorithme génétique utilise la technique de recherche aléatoire à solutions multiples qui s'ancre sur le mécanisme de la sélection naturelle et de la transformation génétique afin de trouver des solutions dans des espaces de recherche. La capacité d'exploration de la recherche à solutions multiples effectuée simultanément dans une population rend les AGs des algorithmes de résolution plus rapides que d'autres techniques de résolution à solution unique (ElMaraghy et al. [221]). L'algorithme génétique commence sa procédure avec un ensemble initial de chaînes de solutions ou de chromosomes, où le contenu de chaque chromosome est constitué d'un ensemble de gènes. La structure de séquençement des gènes dans le chromosome est appelée "codage" de la solution. La Figure

4.1 représente un schéma de codage basique d'une solution d'un algorithme génétique. La Figure 4.2 présente le schéma de base du déroulement d'un algorithme génétique. L'algorithme commence par générer une population initiale de solutions. Une fois que la génération de la population initiale est achevée, la fonction fitness de chaque individu de la population est calculée. Puis, les individus les plus adaptés sont triés et sélectionnés pour la reproduction. Dans l'étape suivante, les opérateurs de croisement et de mutation sont appliqués avec des probabilités aux individus choisis pour combiner, maintenir et transférer les informations et les diversités génétiques des solutions parentales aux solutions descendantes lors d'un processus de recherche itératif. Ce processus se poursuit avec un ensemble d'individus plus adaptés dans une nouvelle population jusqu'à ce qu'un critère d'arrêt soit atteint ou qu'une convergence soit obtenue.

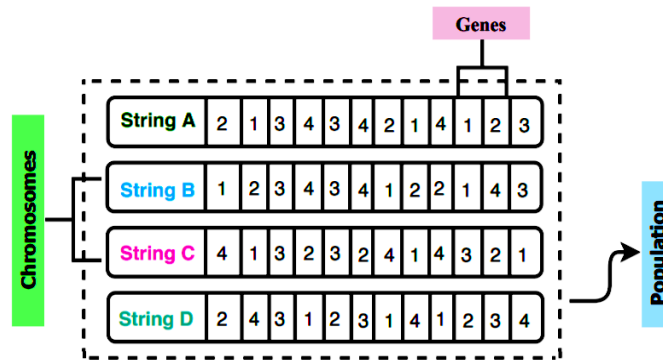


FIGURE 4.1 – Codage basique d'une solution d'un algorithme génétique.

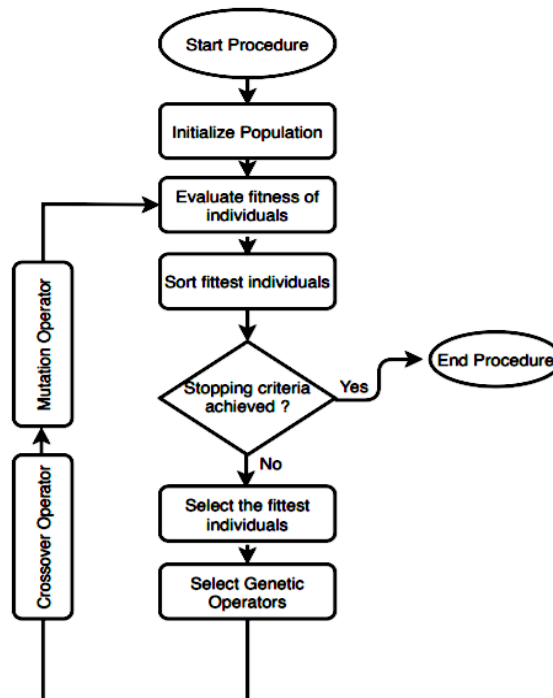


FIGURE 4.2 – Organigramme basique du fonctionnement d'un algorithme génétique.

En résumé, un AG améliore la qualité des solutions obtenues d'une itération à une autre de l'algorithme pour faire émerger la meilleure solution pour le problème étudié. Dans les sections suivantes, les caractéristiques et les composantes principales d'un algorithme génétique sont présentées dans le cadre de la résolution des problèmes d'ordonnancement notamment le FJSP-SDST-JS-MTMR. Les composantes principales d'un algorithme génétique sont : le codage des solutions, la population initiale, la fonction d'évaluation ou la fonction fitness et les opérateurs génétiques qui sont classés en opérateur de sélection, opérateur de croisement ou de recombinaison, et opérateur de mutation ou de perturbation. Ces différentes composantes sont présentées dans ce qui suit.

## 4.2 Représentation des solutions pour le FJSP-SDST-JS-MTMR

Dans la section 2.8 du chapitre 2, nous avons présenté un le schéma de représentation pour le FJSP-SDST. Une représentation similaire peut être utilisée pour résoudre le FJSP-SDST-JS-MTMR, si chaque lot est considéré comme une tâche. Pour mieux expliquer cette représentation, considérons un exemple avec 4 machines et 3 tâches dans un système de type job shop flexible. Les composantes de ce système, notamment le nombre d'opérations, le nombre de lots pour chaque tâche et l'ensemble des machines éligibles pour chaque opération, sont données dans la Figure 4.3. En utilisant le schéma de codage introduit par Kacem [222], l'affectation des opérations et leurs séquençement sur les machines peuvent être codés dans un chromosome, comme le montre la Figure 4.3. Chaque lot est considéré comme une tâche et chaque gène du chromosome est représenté par un quadruple  $(i, l, j, k)$ , désignant l'affectation de la  $j^{eme}$  opération du lot  $l$  de la tâche  $i$  à la machine  $k$ . La séquence des gènes dans le chromosome indique le séquençement des opérations sur chaque machine. Par exemple, en parcourant le chromosome de gauche à droite dans la Figure 4.3, l'affectation et le séquençement des opérations sur la machine 1 peuvent être décodés comme suit :  $(1, 1, 1, 1) \rightarrow (1, 2, 1, 1) \rightarrow (3, 1, 3, 1) \rightarrow (3, 2, 3, 1) \rightarrow (3, 3, 3, 1)$ . Ces informations sont obtenues à partir des gènes 3, 8, 10, 16 et 17 dans le chromosome, où  $k = 1$ . L'affectation des opérations aux machines et leurs séquençements sont décodés en dessous du chromosome dans la Figure 4.3. Dans cette représentation de solutions, pour un  $i$  et  $l$  donnés, le gène  $(i, l, j, k)$  est tout le temps situé à droite de tous les gènes  $(i, l, j', k')$ , où  $j' < j$ . Cela garantit que les contraintes de précédence entre les opérations des lots des tâches ne sont pas violées.



Jobs	Operations	Sub-lots	Set of eligible machines for operations		
			j1	j2	j3
1	3	3	{k1, k2}	{k3}	{k2, k4}
2	2	2	{k3, k4}	{k2}	
3	3	3	{k3}	{k2, k4}	{k1}

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22
3,1,1,3	3,3,1,3	1,1,1,1	1,3,1,2	3,1,2,4	3,2,1,3	3,3,2,4	1,2,1,1	1,1,2,3	3,1,3,1	1,2,2,3	1,1,3,2	3,2,2,2	2,1,1,3	1,2,3,4	3,2,3,1	3,3,3,1	2,2,1,4	1,3,2,3	1,3,3,2	2,2,2,2	2,1,2,2

$i = \text{job index}, l = \text{sub-lot index}, j = \text{operation index}, k = \text{machine index}$

- K = 1 :** (1,1,1) → (1,2,1) → (3,1,3) → (3,2,3) → (3,3,3)
- K = 2 :** (1,3,1) → (1,1,3) → (3,2,2) → (1,3,3) → (2,2,2) → (2,1,2)
- K = 3 :** (3,1,1) → (3,3,1) → (3,2,1) → (1,1,2) → (1,2,2) → (2,1,1) → (1,3,2)
- K = 4 :** (3,1,2) → (3,3,2) → (1,2,3) → (2,2,1)

FIGURE 4.3 – Codage et décodage de solution pour le FJSP-SDST-JS-MTMR.

### 4.3 Architecture d'un algorithme génétique pour le FJSP-SDST-JS-MTMR

#### 4.3.1 Population initiale

La population initiale joue un rôle important dans la performance des algorithmes génétiques. Une population initiale avec plus de diversité des solutions peut éviter une convergence prématurée ou un minimum local. La population initiale est constituée d'un ensemble de chromosomes ou de solutions. Pour que le chromosome puisse être formé et codé, les opérations de chaque lot d'une tâche doivent être affectées et ordonnancées sur les machines. Des heuristiques d'affectation et de séquençement des opérations sur les machines ont été développées pour le FJSP-SDST-JS-MTMR. Dans le présent travail, la population initiale est formée et initialisée sur la base de quatre heuristiques d'affectations et quatre heuristiques de séquençement. La procédure consiste, à chaque itération, à choisir aléatoirement une heuristique d'affectation et de séquençement pour construire une solution. Les heuristiques d'affectation sont basées sur les règles suivantes :

- Random assignment (RA) : les opérations sont affectées aléatoirement aux machines.
- SPT assignment (SPTA) : les opérations sont affectées aux machines selon la règle SPT (Shortest Processing Time). Pour chaque opération, la machine avec le plus petit temps de traitement est sélectionnée pour effectuer cette opération.
- LPT assignment (LPTA) : les opérations sont affectées aux machines selon la règle LPT (Longest Processing Time). Pour chaque opération, la machine avec le plus grand temps de

traitement est choisie pour réaliser cette opération.

- Minimum machine workload assignment (MMWA) : dans cette heuristique, les opérations sont affectées itérativement aux machines en fonction de leurs temps de traitement et les charges de travail des machines. La charge de travail d'une machine dépend de son type. Pour l'ensemble des machines de type  $M1$ , la charge de travail est la somme des temps de traitement des opérations affectées à la machine, tandis que la charge de travail des machines de type  $M2$  et  $M3$ , est la durée totale d'occupation de la machine. L'heuristique consiste à trouver, pour chaque opération, la machine avec la charge de travail minimale.

Les procédures d'affectation des opérations aux machines en utilisant les heuristiques précédentes sont illustrées dans ce qui suit à travers un exemple composé de 4 machines et 3 tâches. Chaque opération d'une tâche peut être traitée par l'une des 4 machines. Les données de cet exemple sont représentées dans la Table 4.1 :

Job	Operation	Machine (S, P)			
		k1	k2	k3	k4
1	1	(10, 20)	(10, 50)	(15, 10)	(10, 30)
	2	(10, 40)	(15, 60)	(15, 80)	(10, 40)
	3	(15, 90)	(10, 70)	(15, 20)	(10, 20)
2	1	(25, 70)	(20, 60)	(20, 40)	(20, 50)
	2	(10, 40)	(10, 80)	(30, 50)	(20, 60)
	3	(15, 90)	(20, 50)	(15, 40)	(15, 70)
3	1	(10, 80)	(15, 60)	(25, 30)	(15, 50)
	2	(15, 30)	(15, 50)	(20, 80)	(15, 30)
$T_k$		70	0	90	130

S : setup times des machines, P : processing times des opérations des tâches,  $T_k$  : temps de préparation de la machine  $k$

TABLE 4.1 – Exemple de FJSP avec setups séquence-dépendants.

La Table 4.2 présente le déroulement des heuristiques d'affectation RA, SPTA et LPTA en utilisant les données de l'exemple présenté dans la Table 4.1.

		RA				SPTA				LPTA			
J	O	k4	k1	k3	k2	k4	k1	k3	k2	k4	k1	k3	k2
3	1	<b>50</b>	80	30	60	50	80	<b>30</b>	60	50	<b>80</b>	30	60
	2	30	30	<b>80</b>	50	<b>30</b>	30	80	50	30	30	<b>80</b>	50
2	1	50	<b>70</b>	40	60	50	70	<b>40</b>	60	50	<b>70</b>	40	60
	2	60	40	50	<b>80</b>	60	<b>40</b>	50	80	60	40	50	<b>80</b>
	3	70	90	<b>40</b>	50	70	90	<b>40</b>	50	70	<b>90</b>	40	50
1	1	30	<b>20</b>	10	50	30	20	<b>10</b>	50	30	20	40	<b>50</b>
	2	40	40	80	<b>60</b>	40	<b>40</b>	80	60	40	40	<b>80</b>	60
	3	<b>20</b>	90	20	70	<b>20</b>	90	20	70	20	<b>90</b>	20	70

TABLE 4.2 – Déroulement des heuristiques d'affectation RA, SPTA et LPTA.

Le but de l'heuristique d'affectation MMWA est l'équilibrage de la charge de travail des machines. La procédure d'initialisation commence par sélectionner, pour chaque opération, la machine avec la charge de travail minimale par une permutation aléatoire des tâches et des opérations. Cette procédure est appelée "première règle d'affectation". Une autre procédure d'affectation est appliquée, qui est appelée "seconde règle affectation". Cette procédure à la différence de la première règle, dans la recherche de la charge de travail minimale globale, analyse et explore l'espace entier de la charge de travail de la machine, au lieu de permuter aléatoirement les opérations et les tâches. Les chaînes de solutions générées par la première règle d'affectation dépend d'un critère connu sous le nom "Assignment Rule Choice" (ARC), où  $0 \leq \text{ARC} \leq 1$ , alors que la seconde règle d'affectation détermine le reste des chaînes de solutions.

Dans la première règle d'affectation de l'heuristique MMWA, la charge de travail est calculée en additionnant les temps de traitement des opérations affectées à la machine. Lors de chaque affectation, la machine présentant la charge de travail minimale est sélectionnée afin d'équilibrer les charges de travail entre les machines. La Table 4.3 présente un exemple du déroulement de l'heuristique MMWA en utilisant la première règle d'affectation. Dans cette table, les charges de travail des machines sont mises à jour en gras.

J	O	k4	k1	k3	k2	k4	k1	k3	k2	k4	k1	k3	k2	...	k4	k1	k3	k2
3	1	50	80	30	60	50	80	<b>30</b>	60	50	80	30	60		50	80	<b>30</b>	60
	2	30	30	80	50	30	30	<b>110</b>	50	<b>30</b>	30	110	50		<b>30</b>	30	80	50
2	1	50	70	40	60	50	70	<b>70</b>	60	<b>80</b>	70	70	60		50	70	40	<b>60</b>
	2	60	40	50	80	60	40	<b>80</b>	80	<b>90</b>	40	80	80	...	60	<b>40</b>	50	80
	3	70	90	40	50	70	90	<b>70</b>	50	<b>100</b>	90	70	50		70	90	<b>40</b>	50
1	1	30	20	10	50	30	20	<b>40</b>	50	<b>60</b>	20	40	50		<b>30</b>	20	10	50
	2	40	40	80	60	40	40	<b>110</b>	60	<b>70</b>	40	110	60		40	<b>40</b>	80	60
	3	20	90	20	70	20	90	<b>50</b>	70	<b>50</b>	90	50	70		<b>20</b>	90	20	70

TABLE 4.3 – Affectations initiales par MMWA tenant compte des temps de traitement des opérations.

L'ordre de réalisation des tâches et des opérations dans les deux premières colonnes de la Table 4.3 est généré aléatoirement lors de la construction de la population initiale. Dans cet exemple, l'ordre de réalisation des tâches est :  $J3 \rightarrow J2 \rightarrow J1$ . En utilisant la première règle d'affectation, pour chaque opération d'une tâche, la machine avec une charge de travail minimale est choisie pour traiter cette opération. Le déroulement de l'heuristique dans la Table 4.3 ne tient compte que des temps de traitement des opérations. Une autre heuristique est proposée, et qui prend également en compte les setup times des machines entre les opérations consécutives et leurs temps de préparation au début de l'ordonnancement. Le déroulement de cette heuristique est expliqué à travers un exemple dans la Table 4.4. La première règle d'affectation est plus efficace, lorsque les setup times des machines et leurs temps de préparation sont nuls.

J	O	k4	k1	k3	k2	k4	k1	k3	k2	k4	k1	k3	k2	...	k4	k1	k3	k2
3	1	195	160	145	75	195	160	145	75	195	160	145	75		195	160	145	75
	2	175	115	190	65	175	115	190	140	175	115	190	140		175	115	190	65
2	1	180	115	120	70	180	115	120	145	180	160	120	145		180	115	120	70
	2	190	120	200	70	190	120	200	145	190	165	200	145	...	190	120	200	70
	3	165	175	125	90	165	175	125	165	165	220	125	165		165	175	125	90
1	1	190	150	145	70	190	150	145	145	190	195	145	145		190	150	145	70
	2	200	120	155	95	200	120	155	170	200	165	155	170		200	120	155	95
	3	210	175	145	60	210	175	145	135	210	220	145	135		210	175	145	60

TABLE 4.4 – Affectations initiales par MMWA tenant compte des temps de traitement des opérations, des setup times des machines et leurs temps de préparation.

La seconde règle d'affectation de l'heuristique MMWA ne nécessite pas une permutation aléatoire des tâches au préalable, contrairement à la première règle d'affectation. Cette règle analyse la matrice de charge de travail et recherche la charge de travail minimale globale. C'est pourquoi la permutation aléatoire des tâches n'est pas obligatoire au départ. Les différentes heuristiques d'affectation présentées ci-dessus sont utilisées pour former les solutions de la population initiale. Le paramètre ARC, défini précédemment permet de déterminer le pourcentage de chromosomes formés par chaque heuristique.

Une fois que l'affectation des opérations aux machines est déterminée, la séquence de ces opérations sur les machines sélectionnées doit être aussi définie pour former les solutions de la population initiale. Les heuristiques proposées pour déterminer le séquençement des opérations sur les machines sont basées sur les règles suivantes :

- Random sequence (RS) : cette heuristique consiste à ordonnancer aléatoirement les opérations sur les machines, tout en respectant les contraintes de précédence entre les opérations des tâches.
- SPT sequence (SPTS) : le séquençement des opérations sur les machines s'effectue selon la règle SPT (les opérations des tâches ayant des temps de traitement plus petit sont ordonnancées en priorité).

- Most Number of Operations Remaining (MNOR) : la séquence des opérations dépend de la tâche qui a le plus grand nombre d'opérations restantes à ordonnancer. Elle consiste à traiter en priorité, les opérations du lot de la tâche qui a le plus d'opérations restantes.
- Most Work Remaining (MWR) : cette heuristique consiste à ordonnancer en priorité, l'opération qui a une plus grande quantité de travail restante, tout en respectant les contraintes de précéence entre les opérations des lots des tâches. Les temps de setup et les temps de traitement des opérations sont additionnés pour calculer le travail restant pour chaque opération. Si les contraintes de précéence sont respectées, l'opération ayant le plus de travail restant est sélectionnée pour être traitée en priorité.

En utilisant l'affectation des opérations aux machines donnée dans la Table 4.4, la Table 4.5 présente le déroulement des heuristiques de séquençement RS, SPTS et MNOR, et la Table 4.6 montre la procédure de calcul du travail restant pour chaque opération. Puis, la séquence des opérations sur les machines est déterminée par l'heuristique MWR.

RS	SPTS
k1 : (J3, O2) → (J1, O2)	k1 : (J3, O2) → (J1, O2)
k2 : (J1, O3) → (J2, O2) → (J3, O1)	k2 : (J3, O1) → (J1, O3) → (J2, O2)
k3 : (J2, O3) → (J2, O1)	k3 : (J2, O3) → (J2, O1)
k4 : (J1, O1)	k4 : (J1, O1)

MNOR
k1 : (J1, O2) → (J3, O2)
k2 : (J2, O2) → (J1, O3) → (J3, O1)
k3 : (J2, O1) → (J2, O3)
k4 : (J1, O1)

TABLE 4.5 – Déroulement des heuristiques de séquençement RS, SPTS et MNOR.

Work Remaining (WR) Calculation			Sequencing of operations on machines	
J	O	WR	Machine	
1	1	$(10+30)+(10+40)+(10+70) = 170$	k1 :	(J1, O2) → (J3, O2)
	2	$(10+40)+(10+70) = 130$		
	3	$(10+70) = 80$		
2	1	$(20+40)+(10+80)+(15+40) = 205$	k2 :	(J3, O1) → (J2, O2) → (J1, O3)
	2	$(10+80)+(15+40) = 145$		
	3	$(15+40) = 55$		
3	1	$(15+60)+(15+30) = 120$	k3 :	(J2, O1) → (J2, O3)
	2	$(15+30) = 45$		
			k4 :	(J1, O1)

TABLE 4.6 – Séquençement initial des opérations par l'heuristique MWR basé sur l'affectation donnée dans la Table 4.4.

Les solutions générées par ces différentes heuristiques doivent respecter les contraintes de précédence entre les opérations des lots des tâches, les dates de fin de production au plus tard des tâches, les fenêtres horaires de disponibilité des machines et les capacités de production des machines. Ces contraintes sont gérées dans la fonction décodage des solutions et sont incluses dans le critère d'optimisation sous forme de pénalités.

### Évaluation de la fonction fitness

Comme le codage des solutions est crucial pour une mise en œuvre réussie d'un algorithme génétique, le décodage des chromosomes est également considéré comme une étape primordiale pour le succès de l'algorithme. Une fois que les chromosomes sont codés, ils doivent être décodés par la suite afin de calculer le temps de présence total ( $\sum C_i$ ) des tâches dans le système de production, qui correspond à la fonction fitness du chromosome. Les chromosomes avec une meilleure fonction fitness ont un temps de présence total plus petit. La fonction d'évaluation est basée sur une étape importante comprenant différents cas possibles (Figure 4.4), et qui permet de déterminer les dates de début et de fin de traitement des opérations des lots des tâches. La fonction d'évaluation des solutions doit prendre en compte : (1) les précédences entre les opérations des lots des tâches ; (2) les capacités de production des machines en nombre de portions ; (3) les dates de fin de production au plus tard des tâches ; (4) les fenêtres horaires de disponibilité des machines ; et (5) les setup times des machines qui dépendent de la séquence des opérations. La procédure de décodage d'un chromosome pour l'évaluation de la fonction fitness est décrite dans l'Algorithme 1 en se basant sur les différents cas possibles présentés dans la Figure 4.4.

---

**Algorithme 1** Étapes d'évaluation de la fonction de fitness d'un chromosome.

---

- **Étape 01** : Poser  $p = 1$
  - **Étape 02** : Soient  $i, l, j, k$ , les valeurs des indices du gène situé à la position  $p$  du chrom ;  
 $i = \text{chrom}[p][0]$ ,  $l = \text{chrom}[p][1]$ ,  $j = \text{chrom}[p][2]$ ,  $k = \text{chrom}[p][3]$
  - **Étape 03** : Calculer le completion time  $C_{iljk}$  de l'opération  $j$  du lot  $l$  de la tâche  $i$ 
    - **Si Cas 01 alors**

$$S_{iljk} = A_k + T_k;$$
    - **Si Cas 02 alors**
      - **Si**  $\text{chrom}[p-1][0] = i$  et  $\text{chrom}[p-1][1] = l'$  et  $\text{chrom}[p-1][2] = j$  et  $\text{chrom}[p-1][3] = k$ , **alors**
        - **Si**  $k \in M_2$  et  $2 * q_i \leq R_k$ , **alors**

$$S_{iljk} = S_{il'jk};$$
        - **Si**  $k \in M_1 \cup M_3$  ou  $2 * q_i > R_k$ , **alors**

$$S_{iljk} = C_{il'jk};$$
-

- Si  $\text{chrom}[p-1][0] \neq i$  ou  $\text{chrom}[p-1][2] \neq j$  ou  $\text{chrom}[p-1][3] \neq k$ , **alors**

$$S_{iljk} = s_{i'j'ijk} + C_{i'l'j'k};$$

- **Si Cas 03 alors**

$$S_{iljk} = \text{Max}\{A_k + T_k, C_{ilj-1k'}\}$$

- **Si  $k \in M_3$ , alors  $NbJob_k = NbJob_k + 1$**

- **Si Cas 04 alors**

- **Si  $\text{chrom}[p-1][0] = i$  et  $\text{chrom}[p-1][1] = l'$  et  $\text{chrom}[p-1][2] = j$  et  $\text{chrom}[p-1][3] = k$ , alors**

- **Si  $k \in M_2 \cup M_3$  et  $2 * q_i \leq R_k$ , alors**

$$S_{iljk} = S_{i'l'j'k};$$

- **Si  $k \in M_1$  ou  $2 * q_i > R_k$ , alors**

$$S_{iljk} = \text{Max}\{C_{i'l'j'k}, C_{ilj-1k'}\}$$

- **Si  $\text{chrom}[p-1][0] \neq i$  ou  $\text{chrom}[p-1][2] \neq j$  ou  $\text{chrom}[p-1][3] \neq k$ , alors**

- **Si  $k \in M_3$  et  $NbJob_k = 1$  et  $CompJobs_{ii'} = 1$  et  $Q_i + Q_{i'} \leq R_k$  et  $S_{i'l'j'k} - C_{ilj-1k'} \leq 0.25$**

$$S_{iljk} = \text{Max}\{S_{i'l'j'k}, C_{ilj-1k'}\}; \quad S_{i'l'j'k} = S_{iljk}; \quad C_{i'l'j'k} = S_{i'l'j'k} + P_{i'l'j'k}; \\ NbJob_k = ++;$$

- **Si  $k \notin M_3$  ou  $NbJob_k \neq 1$  ou  $CompJobs_{ii'} \neq 1$  ou  $Q_i + Q_{i'} > R_k$  ou  $S_{i'l'j'k} - C_{ilj-1k'} > 0.25$**

$$S_{iljk} = \text{Max}\{s_{i'j'ijk} + C_{i'l'j'k}, C_{ilj-1k'}\};$$

- **Si  $k \notin M_3$ , alors**

- **Si  $t_b \leq S_{iljk} \leq t_e$ , alors**

$$S_{iljk} = T_k + t_e$$

- **Si  $t_{b'} \leq S_{iljk} \leq t_{e'}$ , alors**

$$S_{iljk} = T_k + t_{e'}$$

$$C_{iljk} = S_{iljk} + P_{ijk}; \quad C_i = \text{Max}\{C_i, C_{iljk}\}$$

- **Étape 04 :** Si  $p$  est inférieur au nombre total des opérations des lots des tâches, incrémenter sa valeur de 1 et aller à l'étape 2; sinon, aller à l'étape 05
  - **Étape 05 :** Calculer la fonction fitness du chromosome  $\sum_i C_i$ .
-

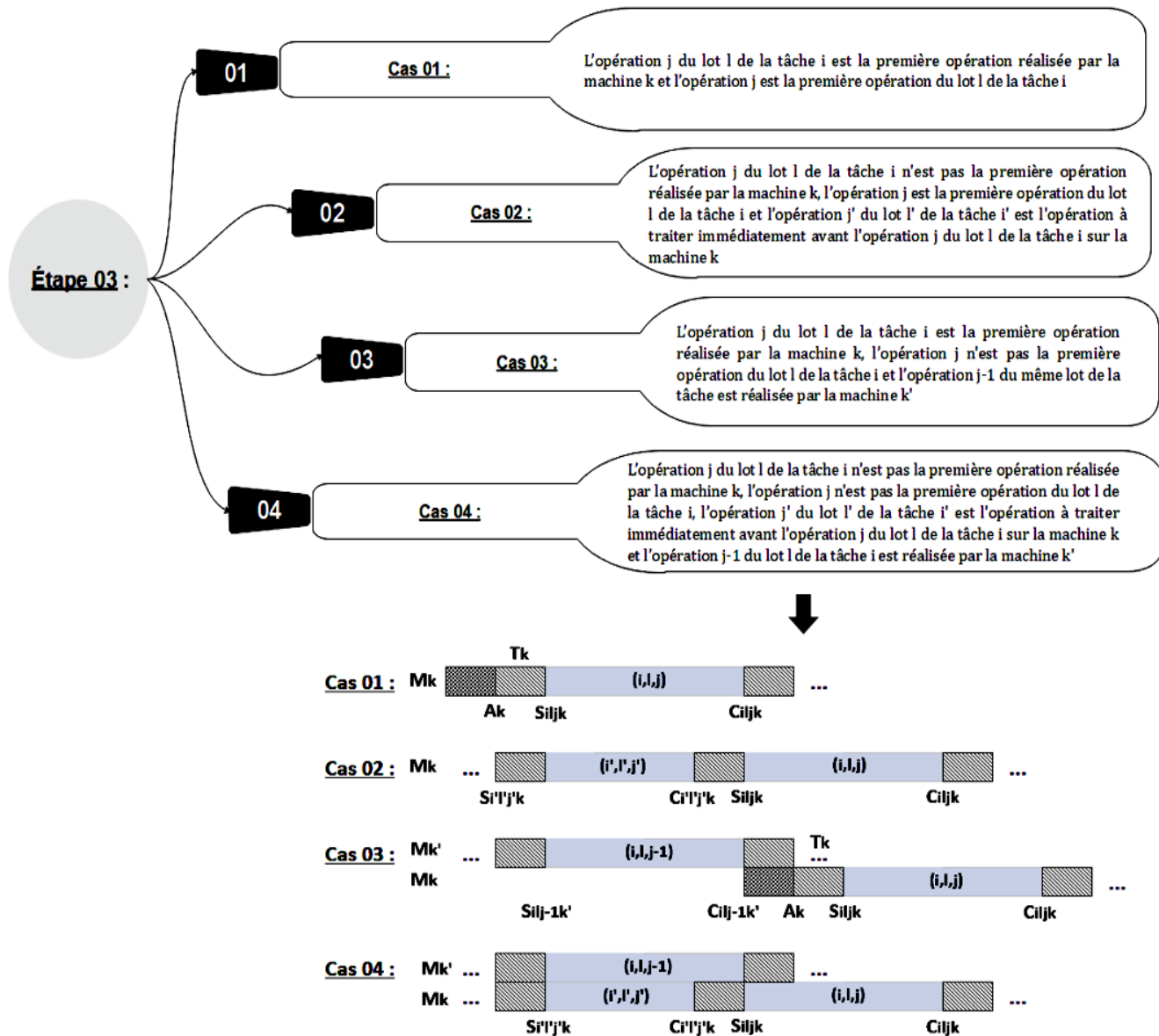


FIGURE 4.4 – Les différents cas possibles pour le décodage d'un chromosome.

La procédure ci-dessus, en particulier l'étape 3, est basée sur la propriété des chromosomes générés selon laquelle, pour un  $i$  et  $l$  donnés, le gène  $(i, l, j, k)$  est toujours situé à droite de tous les gènes  $(i, l, j', k')$ , où  $j' < j$ . Cela permet d'assurer que les contraintes de précédence entre les opérations des lots des tâches ne sont pas violées. Sur la base de cette propriété, lorsque le temps d'achèvement de l'opération  $(i, l, j, k)$  sur la machine  $k$  doit être calculé, le temps de fin de traitement de l'opération  $(i, l, j-1, k')$  est déjà calculé et disponible, quelle que soit la machine choisie pour traiter l'opération  $j-1$ . De plus, le temps d'achèvement de l'opération  $(i', l', j', k)$  à traiter immédiatement avant l'opération  $(i, l, j, k)$  sur la machine  $k$ , est également calculé et disponible.



La convergence d'un algorithme génétique dépend particulièrement des opérateurs génétiques qui permettent d'évoluer la population vers des régions prometteuses de l'espace de recherche. Ces opérateurs sont généralement classés en opérateurs de sélection, de croisement et de mutation.

### 4.3.2 Opérateur de sélection

Le processus de choix des chromosomes parents adaptés au processus de reproduction est appelé sélection. Selon Sivanandam and Deepa [223], le but principal du processus de sélection dans un algorithme génétique est de mettre en évidence les meilleurs individus afin de produire des descendants plus performants. Dans ce travail, nous utilisons un opérateur de sélection par tournois (k-WTS), qui a été introduit dans Goldberg et al. [224]. Le principe de cet opérateur consiste à choisir aléatoirement  $k$  individus parmi une population de solutions. L'individu avec une meilleure fonction fitness ( $\sum_i C_i$  plus petit) est sélectionné pour l'application des opérateurs de croisement et de mutation. Cet individu est ajouté à une population appelée "mating population", qui est utilisée pour former la génération suivante. Ensuite, les individus du tournoi sont remis dans la population courante, et le processus est répété jusqu'à ce que le nombre d'individus ajoutés à mating population soit égal à la taille de la population. Il est important de noter que la qualité des individus obtenus d'une génération à une autre dépend de la valeur de  $k$ . Lorsque  $k$  est élevé, les solutions ayant une meilleure fonction fitness ont plus de chances d'être sélectionnées pour la construction de la prochaine population. Dans le cas où la valeur de  $k$  est faible, cela permet de créer une population de solutions diversifiée.

### 4.3.3 Opérateurs de croisement

Après la sélection des chromosomes pour la reproduction, les opérateurs de croisement sont appliqués afin de produire des chromosomes enfants combinant les caractéristiques génétiques des chromosomes parents, et dans le but d'enrichir la population avec de meilleurs individus (Sivanandam and Deepa [223]). Il s'agit d'une caractéristique spécifique utilisée dans les algorithmes génétiques qui dépend du type de problème traité. L'objectif de l'application des opérateurs de croisement n'est pas seulement de produire des descendants avec une meilleure fonction fitness, mais aussi de produire des descendants valides et réalisables en fonction du type de problème étudié (Sivanandam and Deepa [223], Talbi [225]). Les opérateurs de croisement sont appliqués une fois que la population des solutions est créée. Puis, les individus sont jumelés deux à deux pour former des chromosomes parents pour la construction de la prochaine population. Ensuite, pour chaque paire de chromosomes, l'algorithme sélectionne aléatoirement un des opérateurs de croisement et l'applique avec une certaine probabilité pour créer des individus enfants en échangeant les informations et les propriétés génétiques des chromosomes parents. Il existe différents types d'opérateurs de croisement. Dans ce travail, des opérateurs spécifiques et plus adaptés au problème étudié sont développés. Ces opérateurs peuvent être classés en deux catégories : les opérateurs de croisement d'affectation et de séquençement. Les opérateurs de croisement d'affectation consistent à générer des individus enfants en échangeant l'affectation des opérations aux machines dans les chromosomes

parents, tandis que les opérateurs de croisement de séquençement ont pour rôle de produire de nouveaux individus enfants en échangeant les informations partielles des séquences d'opérations sur les machines dans les chromosomes parents. Les opérateurs de croisement d'affectation et de séquençement développés sont nommés : OMAC (Operation-to-Machine Assignment Crossover) JLOSC (Job Level Operations Sequence Crossover) et SLOSC (Sublot Level Operations Sequence Crossover). La description détaillée ainsi que le fonctionnement de ces différents opérateurs sont présentés dans ce qui suit.

### Opérateur de croisement OMAC

L'opérateur de croisement OMAC est un opérateur d'affectation permettant de créer des individus enfants en échangeant l'affectation d'un ensemble d'opérations dans les chromosomes parents sans modifier les séquences des opérations sur les machines. Les étapes du déroulement de l'opérateur OMAC sont décrites ci-dessous :

- Étape 01 : Choisir un ensemble d'opérations des lots des tâches dans un premier chromosome (parent 1).
- Étape 02 : Les informations génétiques du chromosome parent 1 sont copiées dans le chromosome enfant 1, sans les informations d'affectation des opérations choisies dans l'étape 01.
- Étape 03 : Les informations d'affectation des opérations sélectionnées d'un deuxième chromosome (parent 2) sont copiées dans le chromosome enfant 1.
- Étape 04 : Créer le chromosome enfant 2 en commençant à sélectionner des opérations dans le chromosome parent 2 et réitérer le processus ci-dessus.

Trois opérateurs de croisement de ce type ont été développés OMAC 1, OMAC 2 et OMAC 3. Chacun de ces opérateurs est appliqué selon une probabilité donnée. L'objectif de l'opérateur de croisement OMAC 2, est l'équilibrage de la charge de travail entre les machines, tandis que l'opérateur de croisement OMAC 3 vise à diminuer les dates de fin de traitement plus longues des tâches. La différence entre ces trois opérateurs de croisement réside dans le choix des opérations pour lesquelles les affectations aux machines doivent être modifiées :

- OMAC 1 : un ensemble d'opérations est choisi aléatoirement.
- OMAC 2 : un ensemble d'opérations des lots des tâches affectées aux machines les plus chargées est sélectionné. La procédure de sélection des opérations comprend trois étapes : (1) calcul de la charge de travail de chaque machine ; (2) tri des machines par ordre décroissant de la machine la plus chargée à la machine la moins chargée ; (3) sélection des  $\alpha$  machines plus chargées.
- OMAC 3 : un ensemble d'opérations des lots des tâches ayant des dates de fin de traitement plus grandes est choisi. Les étapes de sélection des opérations sont les suivantes : (1) calcul des dates de fin de traitement des tâches ; (2) tri des tâches par ordre décroissant des dates de fin de traitement des tâches ; (3) sélection des  $\beta$  tâches ayant des temps de complétion plus grands.

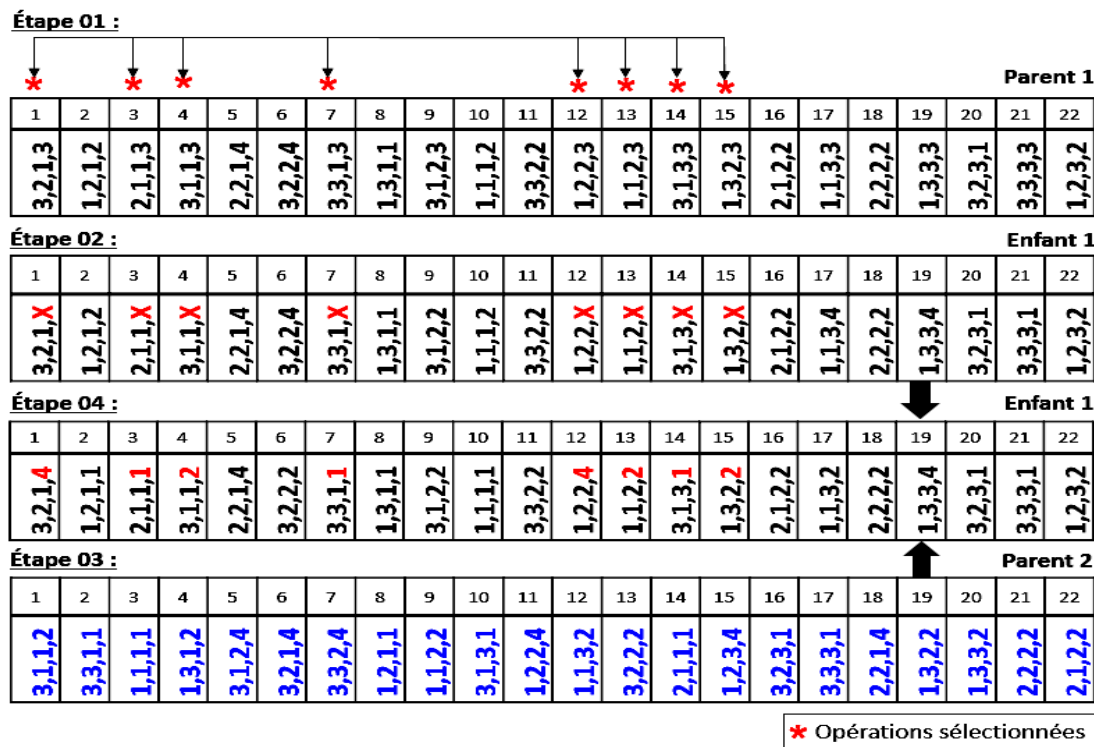


FIGURE 4.5 – Déroulement d'un opérateur de croisement d'affectation OMAC.

La Figure 4.5 illustre le déroulement de l'opérateur de croisement d'affectation OMAC avec les données de l'exemple présenté précédemment (Figure 4.3). À partir d'une paire donnée de chromosomes parent 1 et parent 2, l'opérateur OMAC crée deux chromosomes enfants, tout en préservant la séquence des opérations de chaque chromosome parent, et en modifiant l'affectation des opérations aux machines. Dans la Figure 4.5, nous supposons que dans la première étape, les opérations situées dans les gènes 1, 3, 4, 7, 12, 13, 14 et 15 sont sélectionnées dans le chromosome parent 1 pour modifier leurs affectations. Ensuite, la deuxième étape consiste à copier toutes les informations génétiques du parent 1 vers l'enfant 1, à l'exception des informations d'affectation des opérations sélectionnées dans la première étape. Dans la troisième étape, les informations d'affectation des opérations sélectionnées du parent 2 sont copiées dans les gènes correspondants du chromosome enfant 1. Le chromosome enfant 1 est ainsi créé dans la quatrième étape à l'aide des informations génétiques d'affectation et de séquençement du parent 1 pour l'ensemble des opérations non sélectionnées, et les informations génétiques de séquençement du parent 1 et d'affectation du parent 2 pour les opérations sélectionnées dans l'étape initiale. Le même processus est réitéré pour créer l'enfant 2 en commençant à sélectionner des opérations du chromosome parent 2.

### Opérateurs de croisement JLOSC et SLOSC

Contrairement aux opérateurs de croisement d'affectation, les opérateurs de croisement de séquençement JLOSC et SLOSC permettent de créer des individus enfants en modifiant les séquences d'un

ensemble d'opérations, tout en respectant les contraintes de précédence entre les opérations et sans changer les informations génétiques d'affectation des chromosomes parents. Quatre opérateurs de croisement de ce type ont été développés JLOSC 1, JLOSC 2, SLOSC 1 et SLOSC 2, et sont appliqués selon certaines probabilités. L'objectif de l'opérateur JLOSC 2 et SLOSC 2 vise à conserver le séquençement des opérations des tâches et la séquence des opérations des lots des tâches respectivement, ayant des dates de fin de traitement plus courtes. La différence entre ces opérateurs de séquençement réside dans le choix des opérations pour lesquelles leurs séquences sur les machines doivent être modifiées :

- JLOSC1 et SLOSC1 : les opérations sont choisies aléatoirement.
- JLOSC2 et SLOSC2 : les opérations sont sélectionnées selon des règles spécifiques qui consistent à choisir les opérations des tâches et les opérations des lots des tâches dont les dates de fin de traitement sont plus courtes. La procédure de sélection des opérations se déroule comme suit : (1) calcul des dates de fin de traitement des tâches ; (2) tri des tâches par ordre croissant de leurs dates de fin de traitement ; (3) sélection des  $\gamma$  tâches ayant des temps de complétion plus courts.

Les étapes de création d'un chromosome enfant à l'aide d'un opérateur de croisement de séquençement JLOSC 1 sont décrites ci-dessous :

- Étape 01 : Choisir arbitrairement un ensemble d'opérations des lots des tâches dans le chromosome parent 1.
- Étape 02 : Les opérations choisies dans l'étape 01 sont copiées dans le chromosome enfant 1 telles qu'elles sont dans le chromosome parent 1.
- Étape 03 : Les opérations des lots des tâches restantes sont copiées dans le chromosome enfant 1 telles qu'elles sont dans le chromosome parent 2.
- Étape 04 : Créer le chromosome enfant 2 en commençant par sélectionner un ensemble d'opérations dans le chromosome parent 2 et continuer le processus ci-dessus.

L'opérateur de séquençement SLOSC 1 est similaire à JLOSC 1, à la différence qu'à l'étape 01, un ensemble de lots des tâches ayant des temps de complétion plus courts est choisi. Ainsi, dans l'étape 02, au lieu de conserver la séquence de toutes les opérations des lots des tâches, seules la séquence des opérations des lots sélectionnées dans l'étape 01 est conservée et copiée dans le chromosome enfant.

Les étapes du déroulement de l'opérateur de séquençement JLOSC 2 sont présentées ci-dessous et à travers un exemple dans la Figure 4.6 :

- Étape 01 : Choisir un ensemble de tâches ayant des temps de complétion plus courts dans le chromosome parent 1.
- Étape 02 : Les opérations des lots des tâches choisies dans l'étape 01 sont copiées dans le chromosome enfant 1.

- Étape 03 : Les opérations des lots affectées aux mêmes machines que les opérations des lots des tâches choisies dans l'étape 01, ainsi que les opérations précédentes de ces opérations sont copiées dans le chromosome enfant 1.
- Étape 04 : Le chromosome enfant 1 est rempli avec les opérations restantes du chromosome parent 2, dans l'ordre où elles apparaissent et leurs informations génétiques d'affectation aux machines restent inchangées.
- Étape 05 : Créer le chromosome enfant 2 en commençant par sélectionner un ensemble d'opérations dans le chromosome parent 2 et poursuivre le processus décrit précédemment.

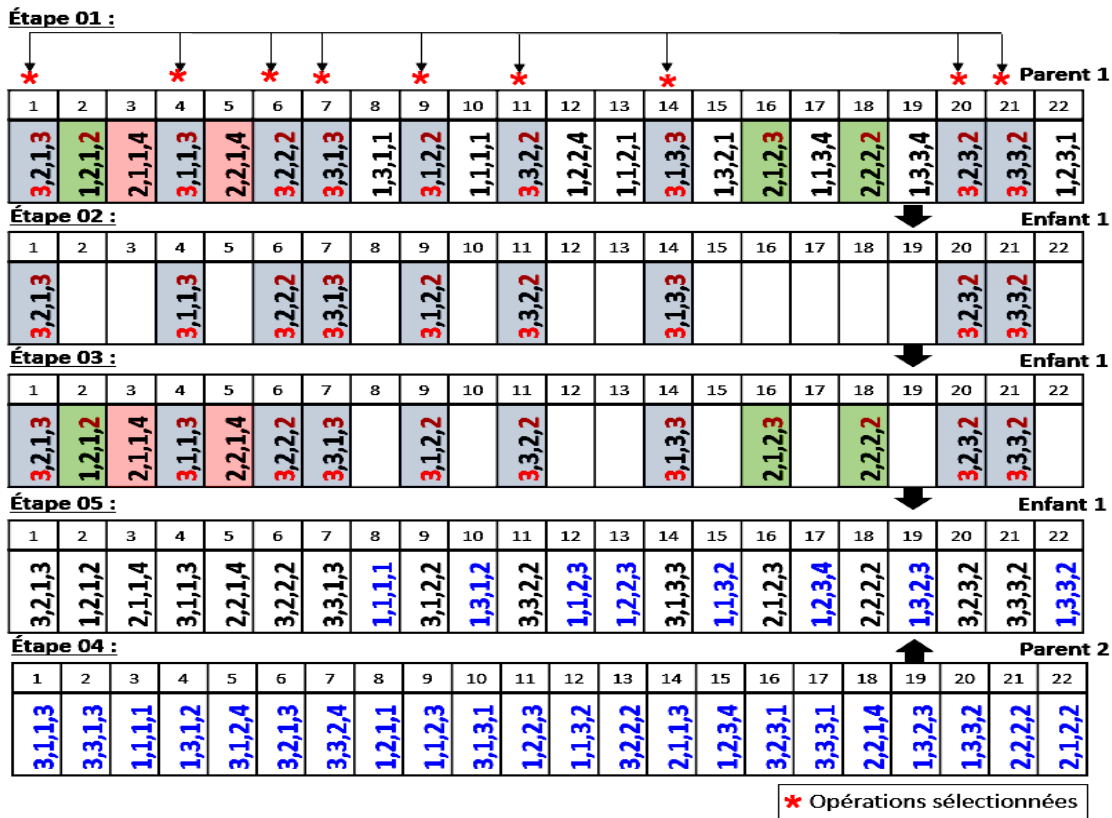


FIGURE 4.6 – Déroulement d'un opérateur de croisement de séquençage JLOSC 2.

La Figure 4.6 explique le fonctionnement de l'opérateur de séquençage JLOSC à travers l'exemple dans la Figure 4.3. Supposons que dans la première étape, les opérations situées dans les gènes 1, 4, 6, 7, 9, 11, 14, 20 et 21 sont sélectionnées dans le chromosome parent 1 pour modifier leurs informations génétiques de séquençage. L'étape suivante consiste à copier toutes les informations génétiques des gènes associés aux opérations choisies dans la première étape vers le chromosome enfant 1. Dans l'étape finale, les gènes vides du chromosome enfant 1 sont remplis, tout en conservant les informations génétiques relatives à l'affectation des opérations aux machines. Ceci est fait en copiant les opérations restantes situées dans les gènes 3, 4, 9, 11, 12, 14, 15, 19, 20 et 22 dans le

chromosome parent 2 vers les gènes vides du chromosome enfant 1, tout en préservant leurs ordres d'apparition dans le chromosome parent 2. La même procédure est répétée pour créer l'enfant 2 en commençant par sélectionner un ensemble d'opérations dans le chromosome parent 2. L'opérateur de séquençement SLOSC (Figure 4.7) est similaire à l'opérateur de séquençement JLOSC, sauf que dans l'étape 01, un ensemble des lots des tâches ayant des dates de fin de traitement plus courtes est choisi. Ainsi, dans la deuxième étape uniquement, les informations génétiques des gènes choisis ayant les mêmes indices de lots et d'opération sont copiées dans le chromosome enfant.

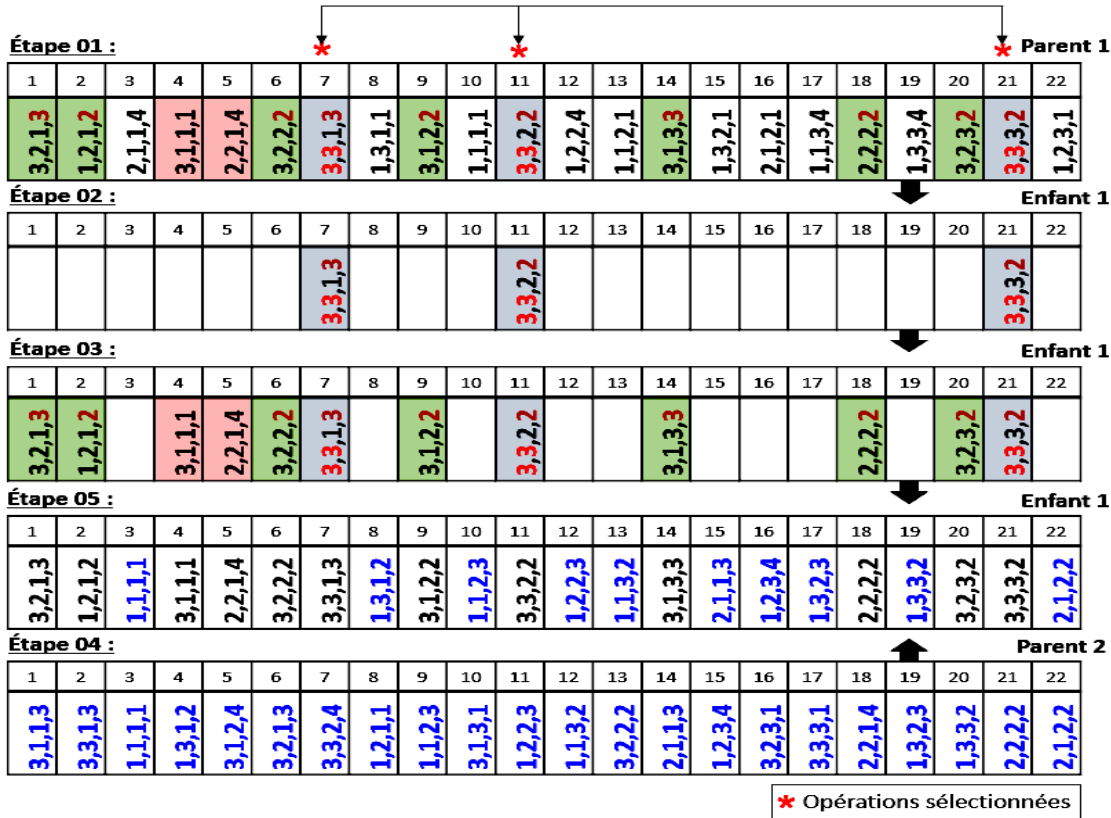


FIGURE 4.7 – Déroulement d'un opérateur de croisement de séquençement SLOSC 2.

Il est important de noter qu'après l'application des opérateurs de croisement de séquençement, le chromosome enfant résultant aura toujours, pour un  $i$  et  $l$  donnés, le gène  $(i, l, j, k)$  est situé à droite du gène  $(i, l, j', k')$ , où  $j' < j$ , ce qui garantit que les contraintes de précédence entre les opérations des lots des tâches ne soient pas violées.

### 4.3.4 Opérateurs de mutation

Après l'application des opérateurs de croisement, chaque chromosome enfant obtenu peut être muté avec une probabilité prédéfinie. Les opérateurs de mutation sont appliqués dans le processus de reproduction avec une faible probabilité afin de maintenir la diversité génétique dans la population,

et ils permettent également de modifier les informations génétiques des gènes afin d'empêcher l'algorithme d'être piégé dans des optima locaux (Talbi [225], Akgündüz and Tunali [226]). Contrairement au rôle des opérateurs de croisement qui consistent à explorer uniquement l'espace de recherche courant pour trouver de meilleures solutions, les opérateurs de mutation permettent d'explorer tout l'espace de recherche (Sivanandam and Deepa [223]). Tout comme le processus de croisement, le processus de mutation doit également produire des solutions valides et réalisables. Les opérateurs de mutation sont aussi classés en opérateurs de mutation d'affectation et de séquençement.

Le rôle de l'opérateur de mutation d'affectation est de modifier les informations génétiques d'affectation des gènes ou d'opérations, tout en conservant la séquence de traitement des opérations sur les machines.

L'opérateur de mutation de séquençement permet de produire de nouveaux individus enfants, en échangeant les informations génétiques de séquençement des gènes dans les chromosomes parents. Les opérateurs de mutation utilisés dans les algorithmes génétiques développés sont :

- ROAM (Random Operation Assignment Mutation) : cet opérateur est appliqué selon une probabilité donnée. Il consiste à choisir aléatoirement un ensemble d'opérations, et à modifier l'affectation de ces opérations à d'autres machines alternatives. La Figure 4.8 illustre les étapes de création d'un nouvel individu à l'aide de cet opérateur.

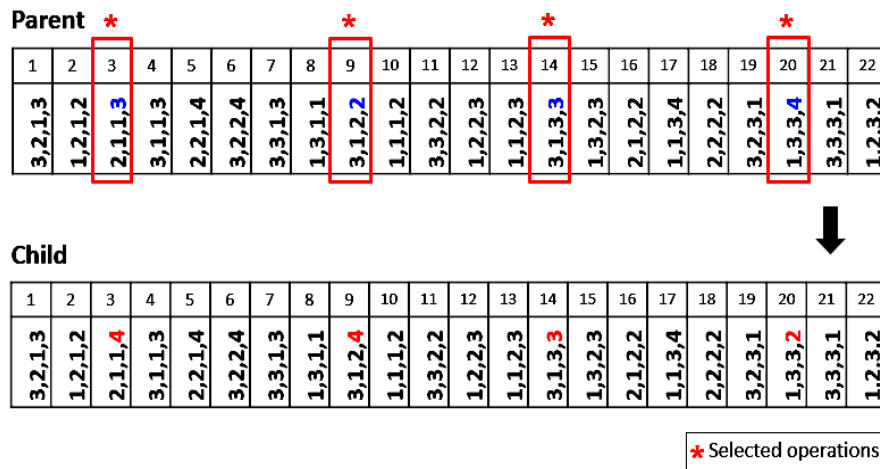


FIGURE 4.8 – Déroulement de l'opérateur de mutation ROAM.

- OSSM (Operations Sequence Shift Mutation) : chaque fois que cet opérateur est appliqué à un chromosome selon une probabilité prédéfinie, un ensemble d'opérations est sélectionné aléatoirement. Ces opérations sont par la suite déplacées vers d'autres positions dans le chromosome, de telle sorte que les contraintes de précédence entre les opérations des lots des tâches ne soient pas violées. La Figure 4.9 montre les étapes du déroulement de cet opérateur.

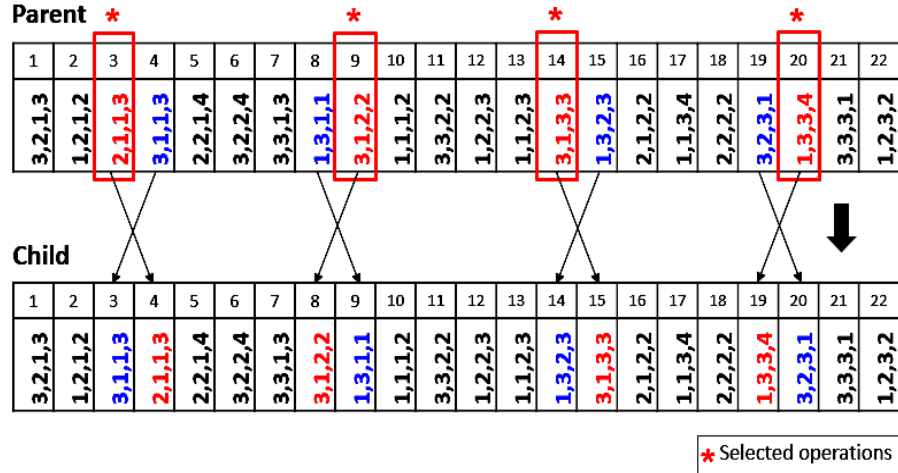


FIGURE 4.9 – Déroulement de l’opérateur de mutation OSSM.

### 4.3.5 Méthodes de recherche locale

#### Recherche locale par mouvement des gènes (LSGM)

Cette méthode de recherche locale permet d’améliorer la qualité de toute solution construite après l’application des opérateurs de croisement et de mutation. Elle est réitérée tant que le nombre maximum d’itérations n’est pas atteint. La procédure du déroulement de cette méthode de recherche locale est illustrée par un exemple dans la Figure 4.10.

La première étape consiste à choisir un ensemble d’opérations des lots des tâches dont les délais d’exécution sont plus longs dans le but de les réduire. Dans la deuxième étape, la procédure effectue une recherche dans le voisinage de la solution, en modifiant les positions des opérations choisies sur les machines afin d’améliorer la qualité de cette solution. Ce processus est répété jusqu’à ce que le critère d’arrêt soit satisfait. Les étapes de cette méthode de recherche locale sont les suivantes :

- Étape 01 : Choisir un ensemble d’opérations des tâches ayant des dates de fin de traitement plus longues dans le chromosome courant.
- Étape 02 : Chaque opération choisie dans l’étape 01 est positionnée juste avant l’opération précédente affectée à la même machine (déplacement à gauche) et juste après l’opération suivante affectée à la même machine (déplacement à droite), tout en respectant les contraintes de précedence entre les opérations des lots des tâches. Ce processus permet de conduire la recherche au voisinage d’une solution, en modifiant le séquençement des opérations sur les machines.
- Étape 03 : Ce processus est réitéré jusqu’à ce que le nombre maximum d’itérations soit atteint.



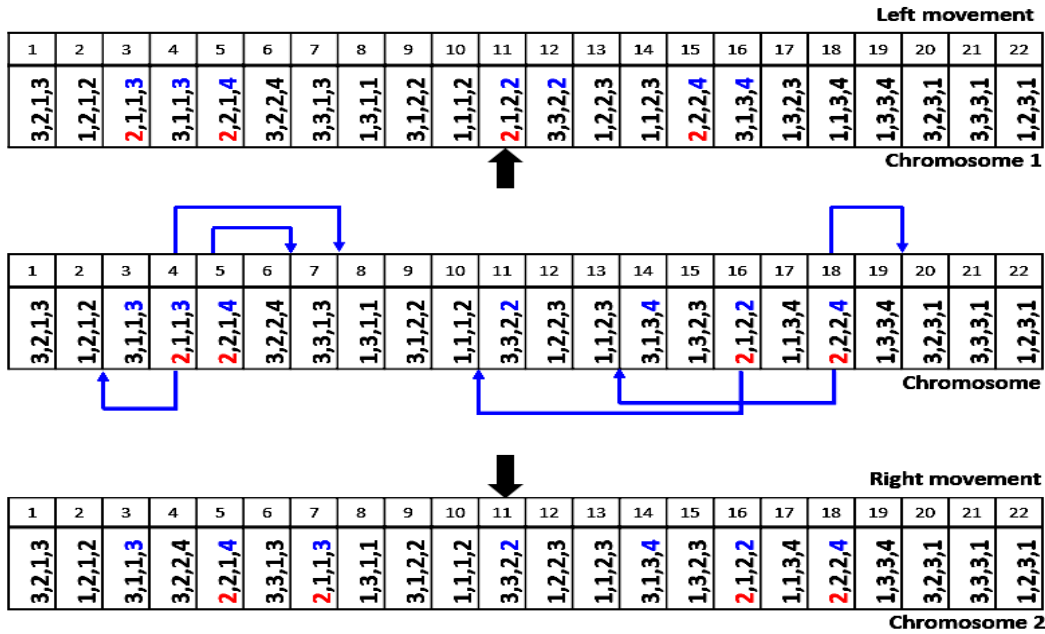


FIGURE 4.10 – Déroulement de la recherche locale par mouvement des gènes.

### Recherche locale par regroupement des lots (LSGL)

Cette méthode de recherche locale consiste à regrouper les opérations des lots des tâches sur des machines, si leur capacité permet de traiter plusieurs opérations en même temps. Cette méthode peut-être appliquée uniquement pour l'ensemble des machines de type  $M_2$  et  $M_3$ . Le fonctionnement de cette méthode est illustré dans la Figure 4.11. Pour chaque gène, la procédure de regroupement des lots consiste à parcourir le chromosome de gauche à droite. Si les lots d'une même tâche que le gène considéré sont affectés à la même machine, et que celle-ci peut traiter plusieurs lots en même temps, tous les gènes de ces lots sont repositionnés les uns à côté des autres dans le chromosome, cela signifie que ces lots sont traités en même temps par la même machine. Le regroupement des opérations sur les machines doit tenir compte des précédences entre les opérations des lots des tâches.

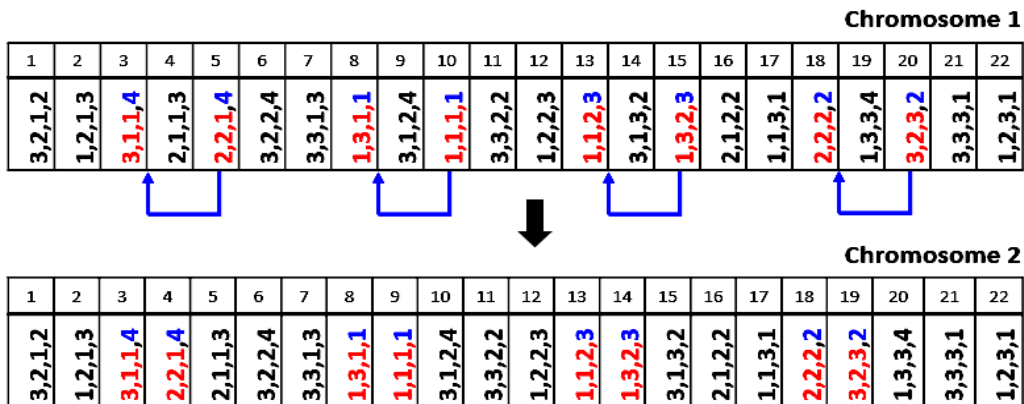


FIGURE 4.11 – Déroulement de la recherche locale par regroupement des lots.

### Recherche locale par affectation intelligente des opérations (LSIOA)

Dans cette approche de recherche locale, un ensemble d'opérations affectées aux machines ayant des charges de travail maximales sont réaffectées aux machines éligibles avec des charges de travail minimales. Les étapes du déroulement de la recherche locale par affectation intelligente des opérations sont représentées dans la Table 4.7, à travers un exemple avec 3 tâches et 4 machines. La procédure commence par calculer la charge de travail de chaque machine. Ensuite, elle sélectionne l'ensemble des opérations affectées aux machines avec des charges de travail maximales. Pour l'ensemble des opérations choisies, l'étape suivante consiste à chercher les machines ayant des charges de travail minimales pouvant réaliser ces opérations. Dans la dernière étape, les opérations initialement choisies sont réaffectées aux nouvelles machines sélectionnées. Il est important de noter que la charge de travail d'une machine dépend de son type. Elle est égale à la somme des durées de traitement des opérations affectées à la machine pour l'ensemble des ressources ne pouvant réaliser qu'une seule opération en même temps, et elle est égale à la durée totale d'occupation de la machine pour l'ensemble des ressources pouvant effectuer plusieurs opérations en même temps.

J	O	k4	k1	k3	k2	k4	k1	k3	k2	k4	k1	k3	k2
1	1	190	150	145	70	<b>190</b>	150	145	70	190	150	145	<b>70</b>
	2	200	120	155	95	200	<b>120</b>	155	95	200	<b>120</b>	155	95
	3	210	175	145	60	210	175	145	<b>60</b>	210	175	145	<b>60</b>
2	1	180	115	120	70	180	<b>115</b>	120	70	180	<b>115</b>	120	70
	2	190	120	200	70	<b>190</b>	120	200	70	190	120	200	<b>70</b>
	3	165	175	125	90	165	175	<b>125</b>	90	165	175	<b>125</b>	90
3	1	195	160	145	75	<b>195</b>	160	145	75	195	160	145	<b>75</b>
	2	175	115	190	65	175	<b>115</b>	190	65	175	<b>115</b>	190	65

TABLE 4.7 – Déroulement de la recherche locale par affectation intelligente des opérations.

### Pseudo-codes des algorithmes génétiques développés

Dans cette section, nous présentons les pseudo-codes des deux algorithmes génétiques développés. L'organigramme dans la Figure 4.12 montre les éléments communs et différents entre ces deux algorithmes. Les deux algorithmes diffèrent dans les heuristiques de génération des solutions de la population initiale, et dans les opérateurs de croisement. Dans le premier algorithme génétique, les solutions sont générées aléatoirement et les opérateurs de croisement se basent sur des choix et des règles aléatoires. Dans le deuxième algorithme génétique, plusieurs heuristiques ont été testées pour la génération des solutions de la population initiale, et des opérateurs de croisement plus adaptés au problème étudié ont été développés. Les opérateurs de mutation et les méthodes de recherche locale sont communs entre les deux algorithmes. Le pseudo-code de l'algorithme génétique générique est donné dans l'algorithme suivant :

---

**Algorithme 2** Pseudo-code de l'algorithme génétique générique

---

1. **Initialisation** : Les solutions de la population initiale sont choisies en utilisant les heuristiques décrites ci-dessus ;
  2. **Évaluation** : Évaluation des solutions de la population initiale en utilisant la procédure de calcul de la fonction de fitness ;  
     $\text{nbIterations} \leftarrow 0$  ;  $\text{nbIndividus} \leftarrow 0$  ;
  3. Application de l'opérateur de sélection k-WTS pour choisir les chromosomes parents à croiser et à muter ;
  4. Choisir aléatoirement l'un des opérateurs de croisement OMAC, JLOSC ou SLOSC ;
  5. Application de l'opérateur de croisement choisi dans 4 ;
  6. Choisir aléatoirement l'un des opérateurs de mutation ROAM ou OSSM ;
  7. Application de l'opérateur de mutation choisi dans 6 ;
  8. Application de la recherche locale par regroupement des lots LSGL sur les chromosomes enfants obtenus après croisement et mutation ;
  9.  $\text{nbIndividus} \leftarrow \text{nbIndividus} + 1$  ;
  10. **Si** la taille de la population est atteinte, **alors** aller à 11, **sinon** aller à 3 ;
  11. Trier les solutions de la population courante dans l'ordre croissant des fonctions fitness ;
  12. Construction de la nouvelle population avec les solutions de la population précédente ;
  13. Application des méthodes de recherche locale par mouvement des gènes LSGM et par affectation intelligente des opérations LSIOA sur les  $\alpha$  meilleures solutions de la nouvelle population ;
  14.  $\text{nbIterations} \leftarrow \text{nbIterations} + 1$  ;
  15. **Si** le nombre maximum d'itérations n'est pas atteint, **alors** aller à 3, **sinon** aller à 16 ;
  16. **Fin de l'algorithme.**
-

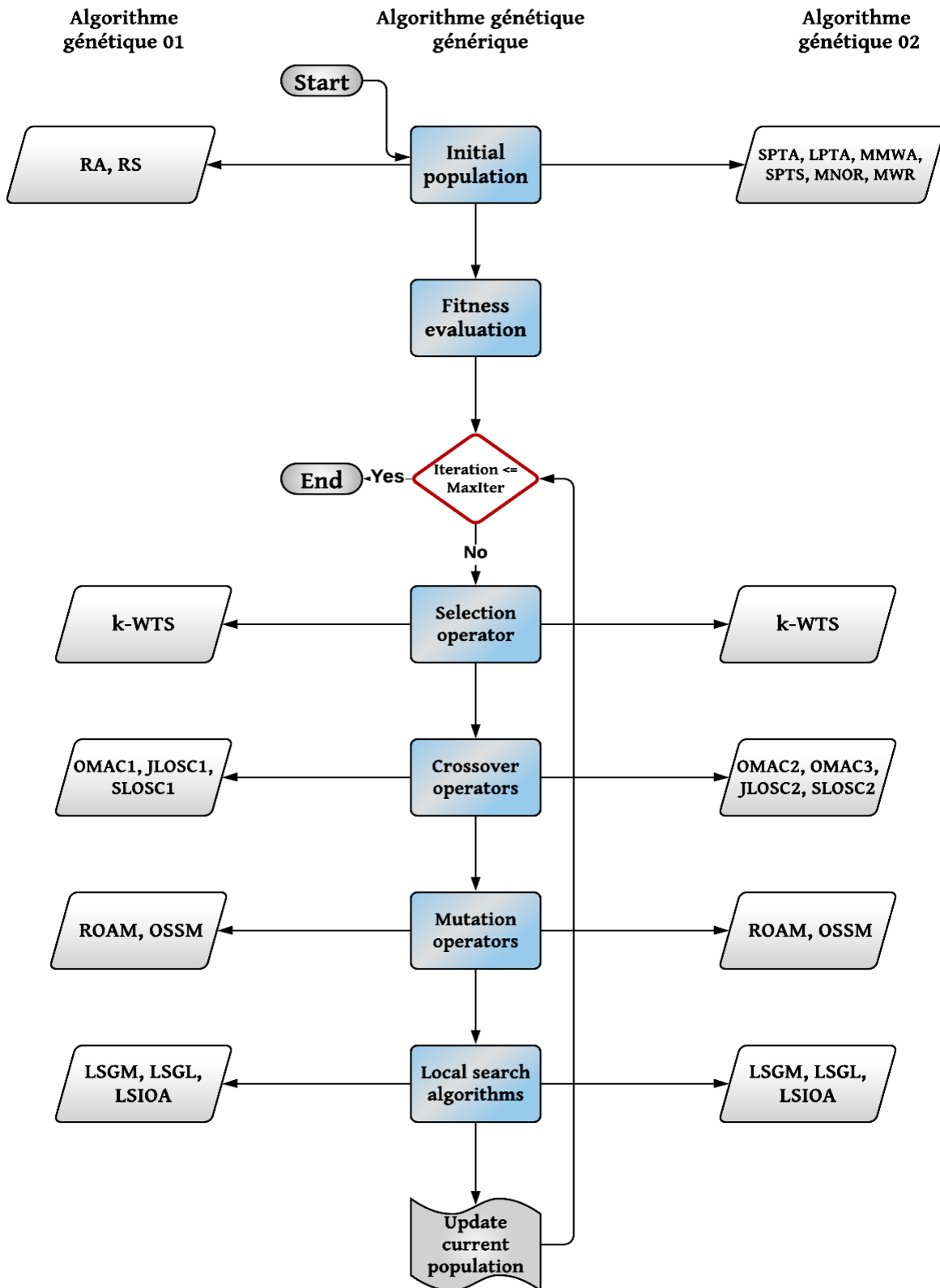


FIGURE 4.12 – Organigramme fonctionnel des algorithmes génétiques développés.

## 4.4 Architecture d'un algorithme de recherche locale itérative pour le FJSP-SDST-JS-MTMR

Dans le but de résoudre le problème FJSP-SDST-JS-MTMR en un temps de calcul court par rapport aux algorithmes génétiques, des algorithmes de recherche locale itérative ont été développées. La recherche locale itérative est une méthode de recherche locale permettant d'améliorer le principe de la recherche locale multi-départ ("multiple start local search") dans lequel des méthodes de descente sont lancées successivement sur des solutions initiales pour contrer l'aspect déterministe de la descente. Ce type de recherche locale a été la première fois utilisé par Martin et al. [227], et il a été clairement défini par Lourenço et al. [228] et Stützle [229]. Ce dernier se base sur le fonctionnement de la méthode de recherche locale standard avec une procédure supplémentaire permettant de perturber une solution, lorsqu'un optimum local est rencontré. En effet, le point faible de la méthode de recherche locale standard, est que quand un optimum local est trouvé, l'algorithme peut rester piégé dans cet optimum local (Lourenço et al. [230], Hoos and Stutzle [231]). La recherche locale itérative permet en effet de remédier à cette faiblesse et de s'échapper d'un optimum local une fois trouvé, en effectuant une perturbation afin d'explorer d'autres voisinages (Stützle [229]). L'algorithme classique de la recherche locale itérative est présenté dans l'algorithme suivant :

---

**Algorithme 3** Algorithme classique de recherche locale itérative.

---

**Donnée :** Solution initiale  $Sol$  à améliorer.

**Résultat :** Solution meilleure (ou au moins égale) que  $Sol$ .

$Sol_*$  = résultat d'une recherche locale sur  $Sol$  ;

**répéter**

$Sol'$ = résultat d'une perturbation de $Sol_*$ ;
$Sol'_*$ = résultat d'une recherche locale sur $Sol'$ ;
$Sol_* = Sol_*$ ou $Sol'_*$ selon un critère d'acceptation ;

**jusqu'à** ce que le critère d'arrêt soit satisfait ;

**retourner**  $Sol_*$  ;

---

L'algorithme de recherche locale itérative commence par une solution initiale et obtient un optimum local dans son voisinage par une procédure de recherche locale. L'ILS applique des opérateurs de perturbation à cette solution afin de s'éloigner de cet optimum local. Un critère d'acceptation est utilisé pour déterminer quel optimum local sera choisi pour la prochaine itération. Ce processus est répété jusqu'à ce qu'un critère d'arrêt soit satisfait.

Cette métaheuristique est composée de plusieurs étapes pouvant chacune être optimisée afin d'obtenir un algorithme général plus performant. Ces différentes étapes sont les suivantes : (1) générer une solution initiale ; (2) appliquer une recherche locale ; (3) appliquer une perturbation ; (4) sélectionner une solution courante selon un critère d'acceptation prédéfini ; (5) choisir un critère d'arrêt de l'algorithme. Dans ce qui suit, chacune de ces étapes sera détaillée.

#### 4.4.1 Génération de la solution initiale

Tout comme pour l'algorithme génétique, la génération de la solution initiale joue un rôle important dans la performance de la recherche locale itérative. En effet, cette solution initiale peut être choisie, en partant d'une solution aléatoire ou générée par une heuristique. Commencer par une telle solution offre l'avantage de partir d'une solution qui est dans la plupart des cas meilleure qu'une solution choisie au hasard (Jain et al. [232]). Dans ce travail, la solution initiale est générée à l'aide des heuristiques d'affectation RA, SPTA, LPTA et MMWA, et de séquençement RS, SPTS, MNOR et MWR utilisées pour la génération de la population initiale des AGs (voir la sous-section 4.3.1), sauf que dans l'algorithme ILS, une seule solution est initialement générée. Les résultats de performance de ces différentes heuristiques sont présentés ci-dessous dans la section 5.3 du chapitre 5.

#### 4.4.2 Procédure de recherche locale

Cette procédure de recherche locale vise à explorer un voisinage qui est déterminé en fonction d'un opérateur qui au départ d'une solution permet d'atteindre des solutions dites voisines. Il s'agit d'une méthode qui cherche dans un voisinage déterminé la meilleure solution, en partant d'une solution et en explorant l'espace de voisinage de cette dernière dans le but de ne garder que la meilleure. Autrement dit, cette procédure permet d'explorer les solutions dites proches de la solution courante. En partant d'une solution  $s$ , la méthode consiste à choisir  $s'$  telle que  $s' \in N(s)$  et si  $f(s') \leq f(s)$ , alors on remplace  $s$  par  $s'$ , où  $N(s)$  représente l'ensemble de voisinage de la solution  $s$  et  $f(s)$  est la valeur de la fonction objective de la solution  $s$ . Ceci est répété jusqu'à ce que,  $f(s') \leq f(s)$  soit vérifié, pour tous les voisins  $s'$  de  $s$ . Dans ce cas, la recherche locale est finie et  $s$  devient un optimum local. Il existe différentes techniques pour choisir le voisin  $s'$ . Les plus connues sont : la méthode "Hill Climbing", la méthode "First Improvement Hill Climbing" et la méthode "Netcrawler" (Marmion [233]).

La méthode Hill Climbing explore tout le voisinage d'une solution. Une exploration exhaustive de l'espace de voisinage est effectuée afin de trouver la meilleure solution. Dans  $N(s)$ , le  $s'$  choisi est celui qui a la meilleure valeur de la fonction objective.

La méthode First Improvement Hill Climbing vise à garder la première solution améliorant la meilleure solution courante. Dans bien des cas, cette technique n'explore donc pas tout le voisinage vu qu'elle arrête l'exploration lorsqu'elle trouve une solution améliorante. Autrement dit, dès que pour  $s' \in N(s)$ ,  $f(s') < f(s)$ ,  $s$  devient  $s'$  et un autre voisinage est exploré.

La méthode Netcrawler, qui est utilisée dans le présent travail permet quant à elle d'explorer le voisinage et de s'arrêter dès qu'elle rencontre une solution dont la valeur de la fonction objective est au moins égale à celle de la solution courante, c'est-à-dire, dès que pour  $s' \in N(s)$ ,  $f(s') \leq f(s)$ ,  $s$  devient  $s'$  et le voisinage de  $s$  va être exploré.

Il existe plusieurs méthodes de recherche locale qui diffèrent dans la manière dont le voisinage à explorer est construit. Ceci dépend des opérateurs appliqués sur la solution courante. Dans cette

étude, la procédure de recherche locale est basée sur deux opérateurs, un opérateur d'affectation (AO) et un opérateur de séquence (SO) qui sont présentés dans ce qui suit.

#### 4.4.3 Opérateur d'affectation AO

L'opérateur d'affectation AO est un opérateur permettant de générer de nouvelles solutions, en échangeant l'affectation d'un ensemble d'opérations dans une solution courante, sans modifier les séquences des opérations sur les machines. Trois opérateurs d'affectation de ce type ont été développés AO 1, AO 2, AO 3. Le but de l'opérateur d'affectation AO 2 est d'équilibrage de la charge de travail entre les machines, tandis que l'opérateur AO 3 permet de diminuer les dates de fin de traitement plus longues des tâches. La différence entre ces différents opérateurs d'affectation est dans le choix de l'ensemble des opérations pour lesquelles les affectations aux machines sont à modifier :

- AO 1 : les opérations des lots des tâches sont choisies aléatoirement.
- AO 2 : un ensemble d'opérations des lots des tâches affectées aux machines les plus chargées est sélectionné. La procédure de sélection des opérations comprend trois étapes : (1) calcul de la charge de travail de chaque machine ; (2) tri des machines par ordre décroissant de la machine la plus chargée à la machine la moins chargée ; (3) sélection des  $\alpha$  machines plus chargées.
- AO 3 : un ensemble d'opérations des lots des tâches ayant des dates de fin de traitement plus grandes est choisi. Les étapes de sélection des opérations sont les suivantes : (1) calcul des dates de fin de traitement des tâches ; (2) tri des tâches par ordre décroissant des dates de fin de traitement des tâches ; (3) sélection des  $\beta$  tâches ayant des dates de fin de traitement plus longues.

Les étapes du déroulement de l'opérateur AO sont décrites dans l'algorithme suivant :

---

**Algorithme 4** Étapes du déroulement d'un opérateur d'affectation AO

---

**Input** : Solution courante à améliorer ;

**Output** : Solution améliorée de la solution courante après la réaffectation et le reséquencement des opérations sur les machines ;

nbIterations  $\leftarrow$  0 ;

**tant que** le nombre maximum d'itérations n'est pas atteint **faire**

- 1) Choisir aléatoirement l'un des opérateurs d'affectation AO 1, AO 2 ou AO 3 ;
- 2) Choisir un ensemble d'opérations dans la solution courante selon la règle du choix des opérations de l'opérateur sélectionné dans l'étape 1 ;
- 3) Réaffectation des opérations choisies dans l'étape 2 à d'autres machines parmi l'ensemble des machines alternatives ;
- 4) **Si** la solution obtenue après la réaffectation des opérations n'est pas meilleure que la solution courante **alors** appliquer un opérateur de séquencement SO sur les opérations choisies dans l'étape 2 avec les affectations aux machines issues de l'étape 3 (reséquencements des opérations sur les nouvelles machines sélectionnées) ;
- 5) nbIterations  $\leftarrow$  nbIterations + 1 ;

**fin**

---

La Figure 4.13 présente le déroulement de l'opérateur d'affectation AO, à travers un exemple avec 3 tâches et 4 machines. La première étape consiste à choisir l'un des opérateurs d'affectation AO 1, AO 2 ou AO 3. Par la suite, un ensemble d'opérations dans la solution courante est choisi selon la règle du choix des opérations de l'opérateur choisi dans l'étape initiale. Dans la prochaine étape, les opérations sélectionnées sont réaffectées à d'autres machines éligibles. La solution courante est remplacée par la solution obtenue après la réaffectation des opérations aux machines si elle est meilleure, et l'algorithme réitère ces étapes avec cette nouvelle solution. Dans le cas contraire, un opérateur de séquençement SO est appliqué sur les opérations initialement sélectionnées avec les nouvelles affectations aux machines obtenues après l'application de l'opérateur AO. Ce processus est répété tant que le nombre maximum d'itérations n'est pas atteint. Il est important de noter que les solutions résultantes après l'application des opérateurs de séquençement doivent préserver l'ordre de précedence entre les opérations des tâches.

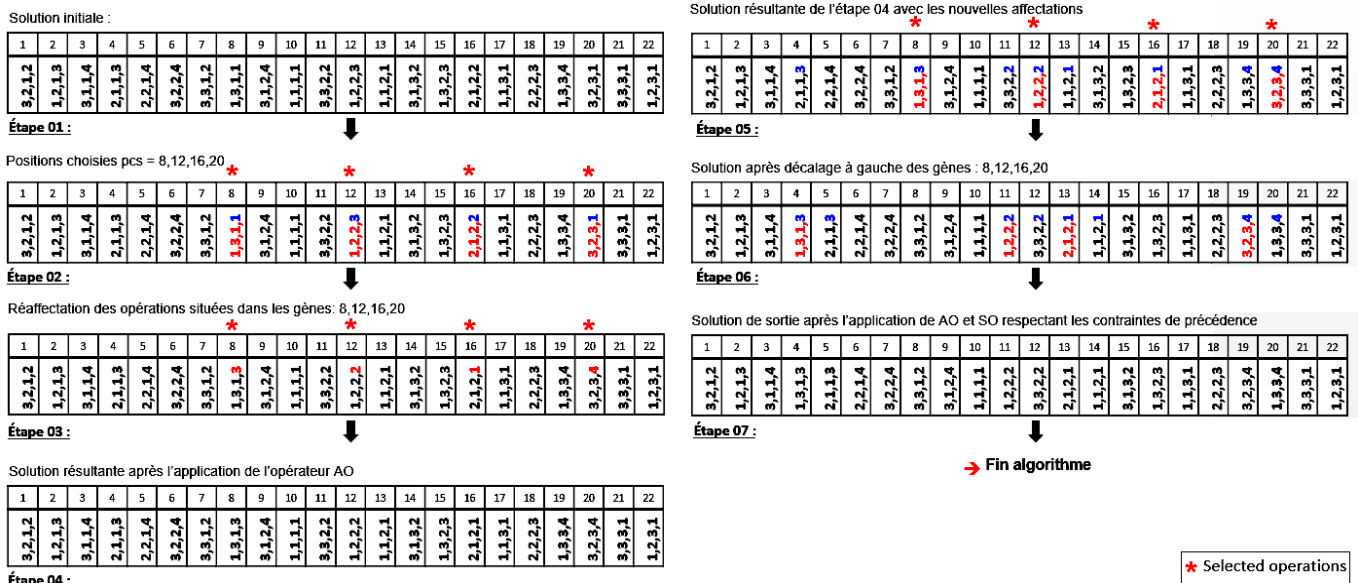


FIGURE 4.13 – Déroulement de l'opérateur d'affectation AO.

#### 4.4.4 Opérateur de séquençement SO

À la différence de l'opérateur d'affectation AO, l'opérateur de séquençement SO permet de générer de nouvelles solutions, en modifiant les séquences d'un ensemble d'opérations, tout en respectant les contraintes de précedence entre les opérations des lots des tâches, et sans changer les affectations des opérations aux machines. Trois opérateurs de ce type ont été développés SO 1, SO 2 et SO 3. L'objectif de l'opérateur SO 2 et SO 3 vise à conserver le séquençement des opérations des tâches et la séquence des opérations des lots des tâches respectivement, ayant des dates de fin de traitement plus courtes. La différence entre ces opérateurs de séquençement réside dans le choix des opérations pour lesquelles les séquences sur les machines doivent être modifiées :



- SO 1 : un ensemble d'opérations des lots des tâches est choisi aléatoirement.
- SO 2 et SO 3 : les opérations sont sélectionnées selon des règles spécifiques qui consistent à choisir les opérations des tâches et les opérations des lots des tâches respectivement, dont les temps de complétion sont plus courts. La procédure de sélection des opérations se déroule comme suit : (1) calcul des dates de fin de traitement des tâches ; (2) tri des tâches par ordre croissant de leurs dates de fin de traitement ; (3) sélection des  $\gamma$  tâches ayant des temps de complétion plus courts.

Les étapes du déroulement de l'opérateur de séquençement SO sont les suivantes :

---

**Algorithme 5** Étapes du déroulement d'un opérateur de séquençement SO
 

---

**Input** : Solution courante à améliorer ;

**Output** : Solution améliorée de la solution courante après le reséquencement des opérations sur les machines ;

nbIterations  $\leftarrow$  0 ;

**tant que** le nombre maximum d'itérations n'est pas atteint **faire**

- 1) Choisir aléatoirement l'un des opérateurs de séquençement SO 1, SO 2 ou SO 3 ;
- 2) Choisir un ensemble d'opérations dans la solution courante selon la procédure de choix des opérations de l'opérateur sélectionné précédemment ;
- 3) Décaler l'ensemble des opérations choisies dans l'étape 2 vers la gauche jusqu'à ce que les permutations de ces opérations avec les opérations précédentes affectées aux mêmes machines soient effectives ;
- 4) **Si** le décalage à gauche est bloqué (les contraintes de précédence sont violées) **alors** à partir de la solution issue de l'étape 3, faire un décalage de l'ensemble des opérations choisies dans l'étape 2 vers la droite jusqu'à ce que les permutations de ces opérations avec les opérations suivantes affectées aux mêmes machines soient effectives ;
- 5) nbIterations  $\leftarrow$  nbIterations + 1 ;

**fin**

---

Les Figures 4.14 et 4.15 illustrent les étapes du déroulement de l'opérateur de séquençement SO, à travers un exemple avec 3 tâches et 4 machines. La première étape de l'opérateur SO consiste à choisir aléatoirement un des opérateurs de séquençement SO 1, SO 2 ou SO 3. Ensuite, un ensemble d'opérations dans la solution actuelle est choisi selon la règle du choix des opérations de l'opérateur sélectionné dans l'étape précédente. L'étape suivante consiste à décaler l'ensemble des opérations sélectionnées vers la gauche afin de les permuter avec les opérations précédentes affectées aux mêmes machines. Si les permutations des opérations sont effectuées sans que les contraintes de précédence soient violées (Figure 4.14), alors la solution résultante est retenue et l'algorithme passe à la prochaine itération. Dans le cas où, les permutations des opérations violent les contraintes de précédence (Figure 4.15), alors, à partir de la solution obtenue dans l'étape précédente, les opérations sélectionnées initialement sont décalées vers la droite afin de les permuter avec les opérations suivantes affectées aux mêmes machines. Ce processus est réitéré jusqu'à ce que le nombre maximum

d'itérations soit atteint. Il est important de noter qu'après l'application de n'importe quel opérateur de séquençement SO, la solution résultante doit respecter les contraintes de précédence.

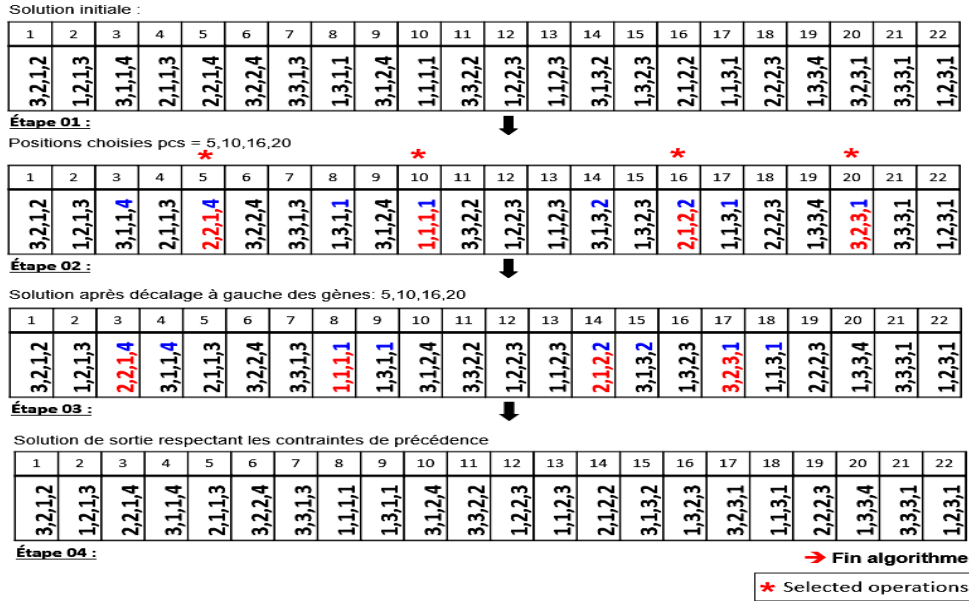


FIGURE 4.14 – Déroulement de l'opérateur de séquençement SO : cas où les contraintes de précédence ne sont pas violées.

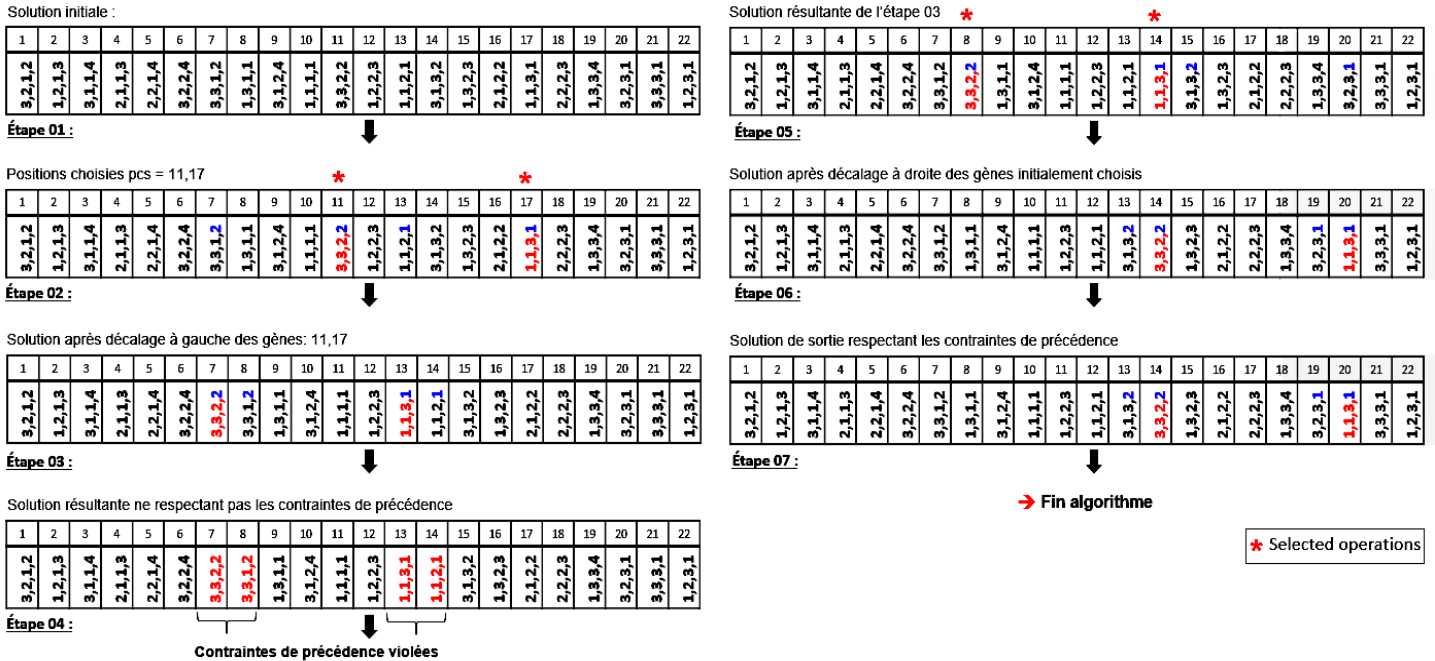


FIGURE 4.15 – Déroulement de l'opérateur de séquençement SO : cas où les contraintes de précédence sont violées.

#### 4.4.5 Procédure de perturbation

Suite à l'application d'une procédure de recherche locale par les opérateurs présentés précédemment, l'algorithme ILS génère un optimum local dans lequel il peut être resté bloqué. La procédure de perturbation permet en effet de s'échapper de cet optimum local. Cette procédure consiste à modifier une solution, déterminée par un critère d'acceptation, afin de pouvoir recommencer une recherche locale sur la base d'une nouvelle solution courante. La Figure 4.16 montre la procédure de perturbation d'une solution dans le but de l'améliorer. Dans cette figure,  $\hat{s}$  est un minimum local qui n'est pas un optimum global. Une perturbation est appliquée sur cet optimum local et un nouveau voisinage  $s'$  est exploré. Sur cette nouvelle solution courante, une recherche locale est effectuée et un nouvel optimum global  $\hat{s}'$  est trouvé.

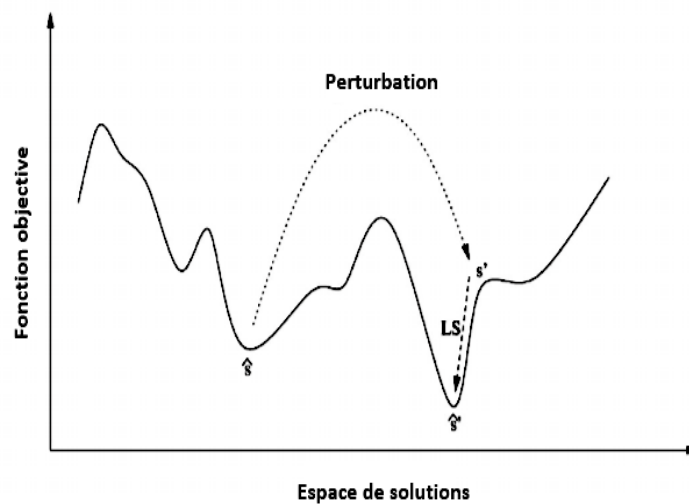


FIGURE 4.16 – Procédure de perturbation d'une solution.

La perturbation est bien souvent un mécanisme plus "intelligent" qu'une simple génération aléatoire de solutions. De ce fait, elle doit modifier suffisamment une solution pour pouvoir accéder à d'autres zones de l'espace de recherche, tout en conservant un minimum de caractéristiques qui font la qualité de la solution initiale. Bien évidemment, ce principe de perturbation dépend fortement du type de problème étudié. Le but étant d'être capable d'obtenir des perturbations intelligentes qui permettent de tendre vers les zones non encore explorées contenant des optima locaux de meilleure qualité voire même d'atteindre la solution optimale. Dans ce travail, une nouvelle technique est utilisée et qui consiste à effectuer des perturbations si le degré de similarité entre les solutions est inférieur à un seuil prédéfini, ce qui assure une distance suffisante entre les solutions. Tout comme la procédure de recherche locale, il existe différentes méthodes de perturbation. Dans le présent travail, la procédure de perturbation est basée principalement sur les opérateurs d'affection et de séquençement présentés dans la sous-section précédente. Le déroulement de la procédure de perturbation est décrit dans l'algorithme suivant :

---

**Algorithme 6** Déroulement de la procédure de perturbation d'une solution

---

**Input** : Solution courante à perturber ;

**Output** : Solution perturbée de la solution courante après le reséquencement ou la réaffectation des opérations ;

nbPerturbations  $\leftarrow$  0 ;

**tant que** le nombre maximum de perturbations n'est pas atteint **faire**

- 1) Choisir aléatoirement l'un des opérateurs SO ou AO ;
- 2) Application de l'opérateur de séquencement ou d'affectation choisi dans l'étape 1 ;
- 3) nbPerturbations  $\leftarrow$  nbPerturbations + 1 ;

**fin**

---

### Critère d'acceptation

Le critère d'acceptation détermine la solution sur laquelle la procédure de perturbation est appliquée. Ainsi, une fois que la recherche locale termine l'exploration d'un voisinage d'une solution, l'algorithme ILS doit par la suite déterminer quelle solution sera retenue pour les prochaines itérations. Le critère d'acceptation joue un rôle important, puisqu'il détermine la solution sur laquelle se base la procédure de perturbation. De plus, il peut jouer un rôle en favorisant plutôt une intensification ou une diversification (Lourenço et al. [234]). En général, il existe quatre critères d'acceptation qui sont présentés dans Lourenço et al. [234]. Dans cette étude, le critère d'acceptation utilisé consiste à sélectionner comme solution courante, la meilleure solution trouvée jusqu'à présent. Il s'agit en effet de l'ordonnancement présentant la plus faible fonction objective parmi tous les ordonnancements visités et les voisinages explorés.

### Critère d'arrêt

L'algorithme ILS procède à des perturbations suivies de recherches locales jusqu'à ce qu'un critère d'arrêt soit atteint. Ce critère d'arrêt est dans la plupart des cas, le temps d'exécution ou le nombre d'itérations. Dans le présent travail, le nombre maximum d'itérations et le degré de similarité entre les solutions sont utilisés comme critères d'arrêt de l'algorithme ILS. Le critère d'arrêt basé sur le degré de similarité, consiste à effectuer une perturbation si le degré de similarité entre les solutions est inférieur à un seuil prédéfini, ce qui assure une distance suffisante entre les solutions. L'évaluation du degré de similarité est basée sur les écarts entre les solutions et sur les distances de Manhattan et Hamming.

Les différentes étapes du déroulement de la méthode de recherche locale itérative sur une itération sont illustrées par un exemple dans la Figure 4.17. L'algorithme commence par générer une solution initiale à l'aide de l'une des heuristiques d'affectation et de séquencement. Par la suite, l'un des opérateurs de séquencement SO est appliqué. Si aucune amélioration de la solution n'est obtenue après l'application de l'opérateur SO, l'étape suivante consiste à appliquer un opérateur d'affectation AO sur les opérations choisies au préalable. Si l'application de l'opérateur AO n'améliore

pas la solution initialement générée, un opérateur SO est appliqué sur la solution courante avec les nouvelles affectations obtenues après l'application de l'opérateur AO. Si la solution n'est toujours pas améliorée, une procédure de perturbation est appliquée sur cette solution, et l'algorithme passe à l'itération suivante. Cette procédure consiste à appliquer l'un des opérateurs de séquençement ou d'affectation choisi aléatoirement. Ce processus est répété jusqu'à ce que le critère d'arrêt n'est pas atteint.

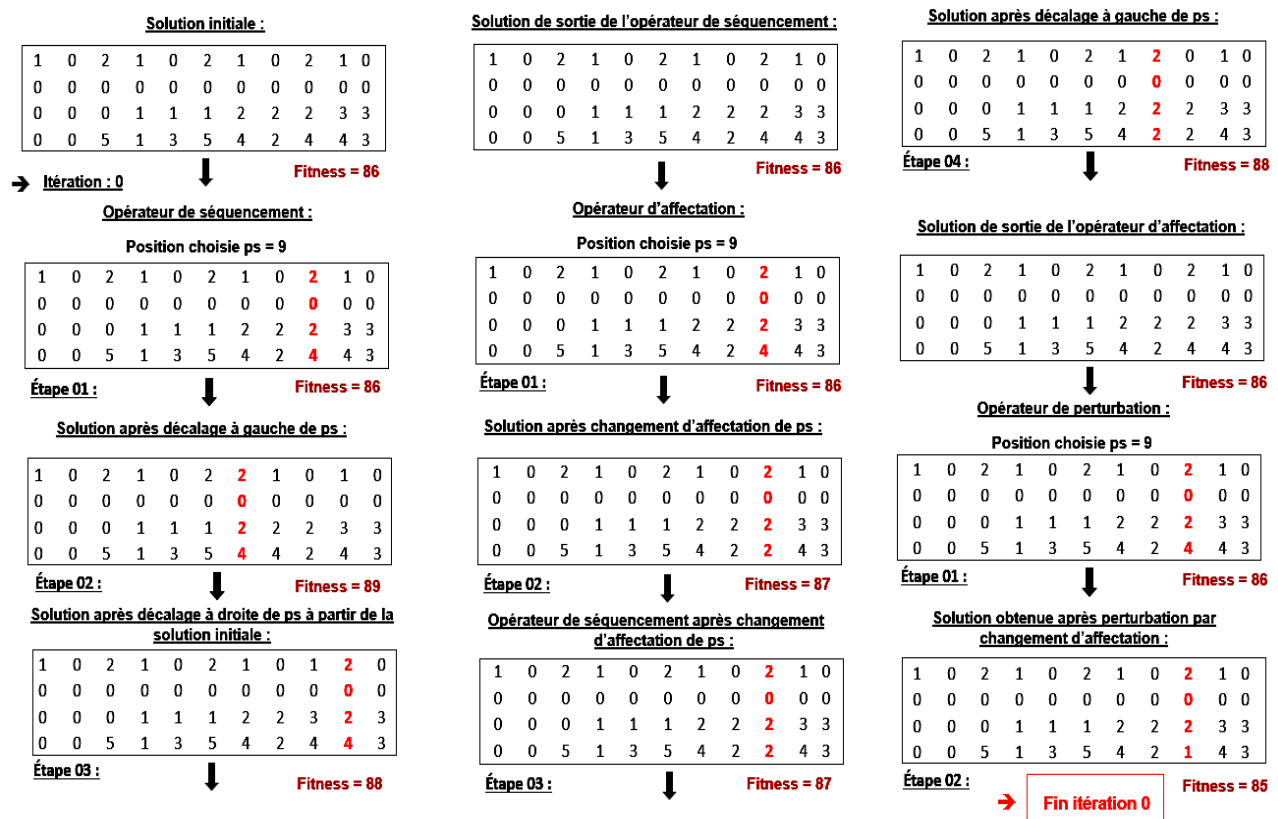


FIGURE 4.17 – Déroulement de l'algorithme ILS sur une itération.

## Pseudo-codes des algorithmes de recherche locale itérative développés

Dans cette sous-section, nous présentons deux algorithmes de recherche locale itérative développés pour résoudre le FJSP-SDST-JS-MTMR. Sur la Figure 4.18 sont indiqués les éléments communs et ceux qui diffèrent entre ces deux algorithmes. La différence entre les deux algorithmes réside dans la génération de la solution initiale et dans les opérateurs d'affectation et de séquençement. Pour les deux algorithmes, plusieurs heuristiques ont été testées pour la génération de la solution initiale. De plus, dans le premier algorithme, les opérations dont on cherche à changer leurs affectations et séquençement sont choisies aléatoirement, alors que dans le deuxième algorithme le choix de ces opérations se base sur des règles développées et spécifiques au problème traité. Le pseudo-code de l'algorithme ILS générique est décrit dans l'algorithme suivant :

---

**Algorithme 7** Pseudo-code de l'algorithme de recherche locale itérative générique

---

1. **Initialisation** : Générer une solution initiale ;  
solution courante  $\leftarrow$  solution initiale ;
  2. **Évaluation** : Évaluation de la solution initiale ;  
nbPerturbation  $\leftarrow$  0 ;
  3. Application de l'opérateur de séquencement SO ;
  4. **Si** la solution est améliorée dans 3 **alors** solution courante  $\leftarrow$  solution obtenue dans 3  
**sinon** aller à 5 ;
  5. Application de l'opérateur d'affectation AO ;
  6. **Si** la solution est améliorée dans 5 **alors** solution courante  $\leftarrow$  solution obtenue dans 5  
**sinon** aller à 7 ;
  7. Application de l'opérateur de perturbation sur la solution courante ;
  8. nbPerturbation  $\leftarrow$  nbPerturbation + 1 ;
  9. **Si** le critère d'arrêt n'est pas atteint **alors** aller à 3 **sinon** aller à 10 ;
  10. **Fin de l'algorithme.**
-

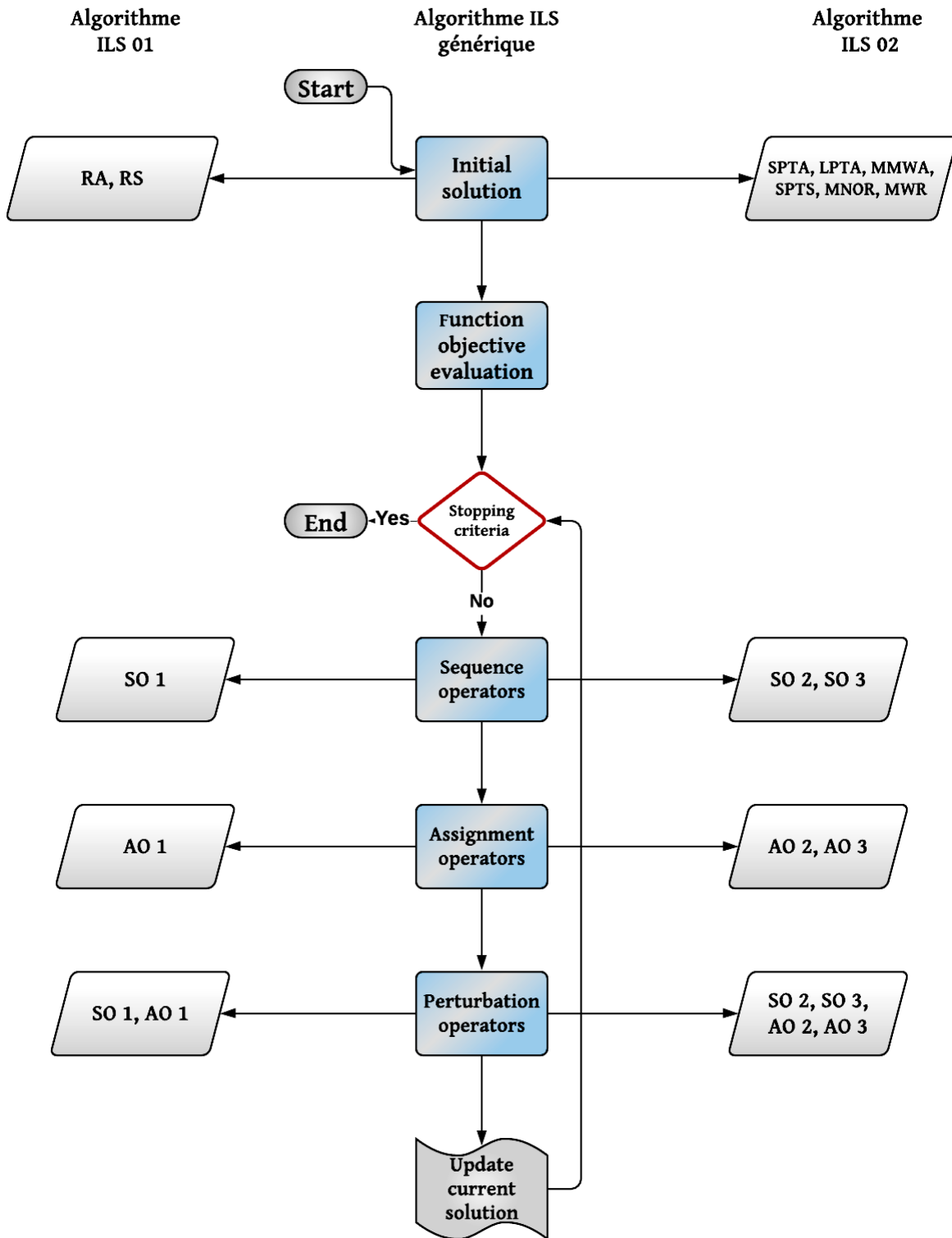


FIGURE 4.18 – Organigramme fonctionnel des algorithmes de recherche locale itérative développés.

## 4.5 Conclusion

Pour résoudre efficacement le problème FJSP-SDST-JS-MTMR traité dans cette étude, des méthodes d'optimisation basées sur des algorithmes génétiques et des méthodes de recherche locale itérative ont été développées. Ce chapitre a été consacré particulièrement sur une description détaillée du fonctionnement de ces métaheuristiques et leurs différents éléments. Dans un premier temps, les schémas de codage et de décodage des solutions proposés pour le problème étudié ont été présentés et expliqués. Par la suite, une description de l'architecture des approches de résolution développées a été fournie, en présentant le fonctionnement des heuristiques de génération des solutions initiales, les étapes d'évaluation et de décodage des solutions, le fonctionnement des opérateurs développés et les méthodes de recherche locale. Dans le prochain chapitre, nous nous focalisons sur une présentation et discussion des résultats expérimentaux d'implémentation de ces approches de résolution sur des instances réelles et théoriques de différents types et tailles. Ces résultats expérimentaux permettent de valider la fonctionnalité des métaheuristiques développées dans cette étude et d'évaluer leur efficacité et performance.





# Chapitre 5

## Résultats expérimentaux

### 5.1 Introduction

Ce chapitre a pour but de présenter les résultats numériques des algorithmes génétiques et des méthodes de recherche locale itérative développées pour le FJSP-SDST-JS-MTMR, pour évaluer leur performance et efficacité. Dans un premier temps, la méthodologie de génération des données et de construction des instances est présentée. Ensuite, les résultats d'une étude sur l'évaluation de performance des heuristiques de génération des solutions initiales et des opérateurs développés, ainsi que la méthodologie de réglage et d'optimisation des paramètres sont présentés. Par la suite, des résultats détaillés sur plusieurs instances de différents types et tailles sont présentés et discutés. De plus, des exemples de problèmes de petites tailles et les résultats de calcul sont fournis afin de mettre en évidence les caractéristiques du problème étudié et pour démontrer les performances des méthodes de résolution développées. Pour la validation des algorithmes développés et pour l'évaluation de leurs efficacités, une étude de comparaison entre les solutions obtenues avec les AGs et les solutions du modèle mathématique, a été effectuée sur l'ensemble des instances test. La qualité des solutions, la vitesse de convergence et la robustesse des algorithmes ont été utilisées comme critères de comparaison. Les résultats de cette étude de comparaison sont présentés et discutés en détail dans les dernières sections de ce chapitre.

### 5.2 Génération des données et construction des instances

Les métaheuristiques présentées précédemment ont été codées en utilisant le langage de programmation Java Eclipse IDE 2019, et ont été testées sur 250 instances de différentes tailles et types : instances réelles du CHT, instances générées aléatoirement de type CHT, instances générées aléatoirement et des instances adaptées de la littérature (Azzouz et al. [214], Bagheri et al. [168], Pezzella et al. [204], Pezzella et al. [204], Lee et al. [178], Mousakhani [169], Sriboonchandr et al. [215]). Les instances réelles du CHT ont été construites après avoir collecté les données nécessaires en temps réel et chronométré les durées de traitement des opérations des plats des exemples de journées de production. Les instances générées aléatoirement de type CHT ont été construites à partir des

données (telles que : le nombre de machines, les dates d'échéance des tâches, fenêtres temporelles de disponibilité des machines) issues des instances réelles du CHT. Les autres paramètres de ces instances, ainsi que les paramètres des instances générées aléatoirement, ont été obtenus à partir des lois de distribution uniforme. Ces paramètres sont présentés dans la section 3.4 du chapitre 3. Pour tester et adapter les instances de la littérature au problème étudié, les données manquantes, telles que : les quantités des plats, les dates d'échéance des tâches, les capacités des machines, et les fenêtres temporelles de disponibilité des machines, ont été générées aléatoirement selon des lois de distribution uniforme en tenant compte des données sur les temps de traitement des opérations et les temps de setups des machines de ces instances.

### 5.3 Performance des heuristiques de génération des solutions initiales

Le choix des solutions initiales conditionne fortement la rapidité et la qualité de performance des métaheuristiques. De ce fait, pour tester les performances des heuristiques de génération des solutions initiales proposées, (voir sous-section 4.3.1), des tests de combinaison deux à deux des heuristiques d'affectation et de séquençement ont été effectués sur plusieurs instances, afin d'étudier le comportement des métaheuristiques avec ces différentes combinaisons d'heuristiques, et pour évaluer ainsi leurs performances en terme de rapidité et qualité de solutions obtenues. Les figures ci-dessous illustrent les résultats de ces tests sur des instances réelles du CHT. Ces instances sont présentées dans ce qui suit dans la Table 5.14 dans la section 5.7. Les Figures 5.1, 5.3, 5.5, 5.7 présentent la variation des temps d'exécution des AGs et des ILSs avec les différentes heuristiques de génération de solutions initiales testées. D'après les résultats présentés dans ces figures, on constate que les différentes métaheuristiques sont plus rapides avec les heuristiques d'affectation RA et de séquençement RS. Le temps d'exécution de ces métaheuristiques avec les heuristiques MMWA et MWR est plus long par rapport aux autres combinaisons d'heuristiques d'affectation et de séquençement. Les Figures 5.2, 5.4, 5.6, 5.8 présentent l'évolution des fonctions objectives dans chaque algorithme, avec les différentes heuristiques proposées.

D'après ces résultats, on remarque que le premier algorithme génétique est plus efficace en termes de qualité avec les heuristiques MMWA et SPT (Figure 5.2), tandis que le second algorithme génétique est plus efficace avec les heuristiques MMWA et MNOR (Figure 5.4).

Concernant les méthodes de recherche locale itérative, le premier algorithme donne de meilleures solutions avec les heuristiques SPT et MNOR (Figure 5.6), alors que le second algorithme trouve de bonnes solutions avec les heuristiques MMWA et MNOR (Figure 5.8). Il est important d'indiquer que dans ces figures, les instances sont référencées par leurs nombre d'opérations dans les axes d'abscisses.

## Résultats des algorithmes génétiques

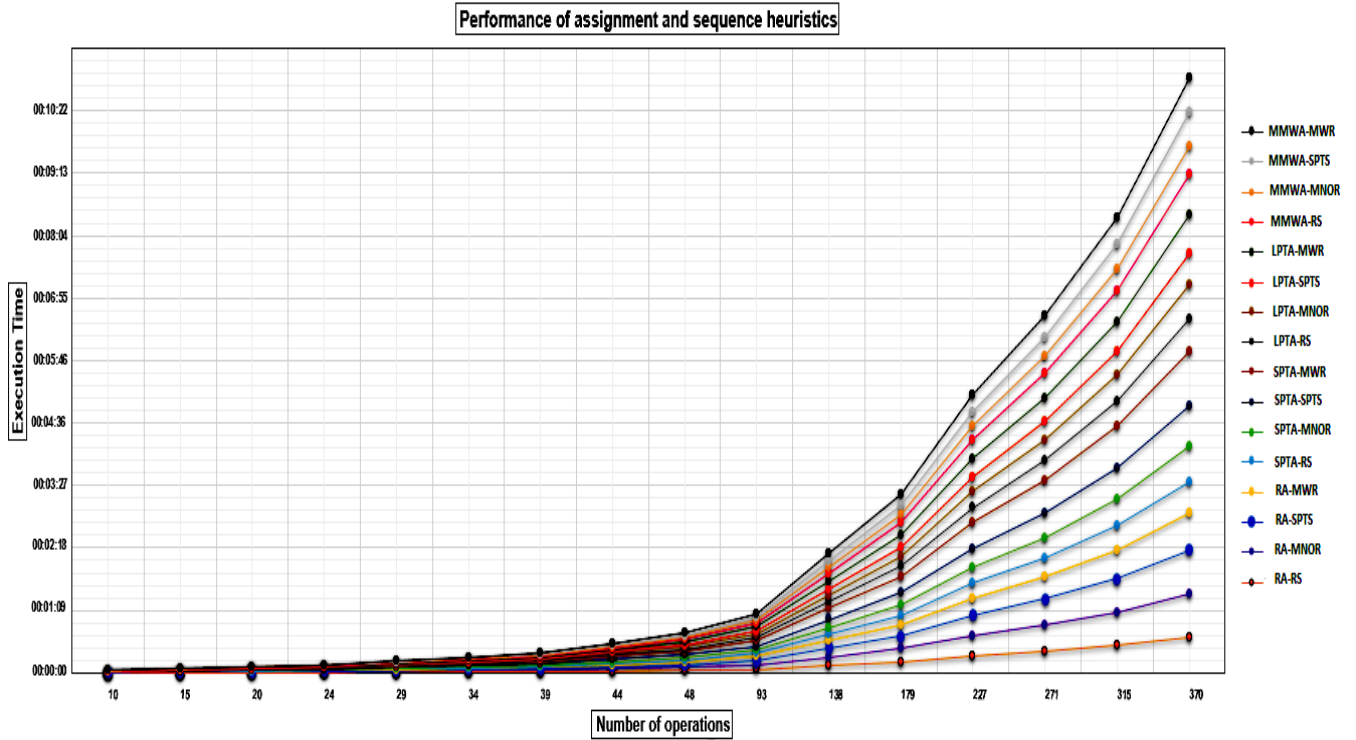


FIGURE 5.1 – Temps d'exécution du GA 1 avec les différentes combinaisons des heuristiques d'affectation et de séquençement.

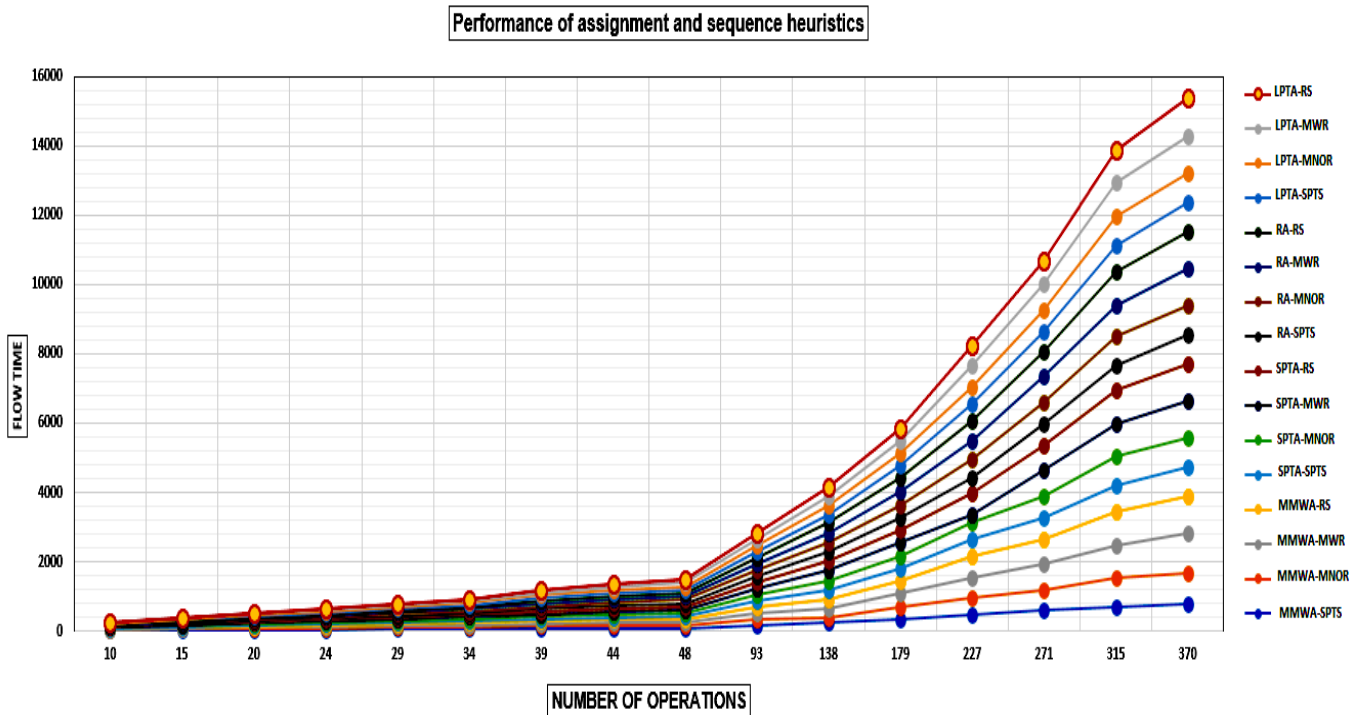


FIGURE 5.2 – Évolution de la fonction fitness  $\sum_i C_i$  dans GA 1 avec les différentes combinaisons des heuristiques d'affectation et de séquençement.

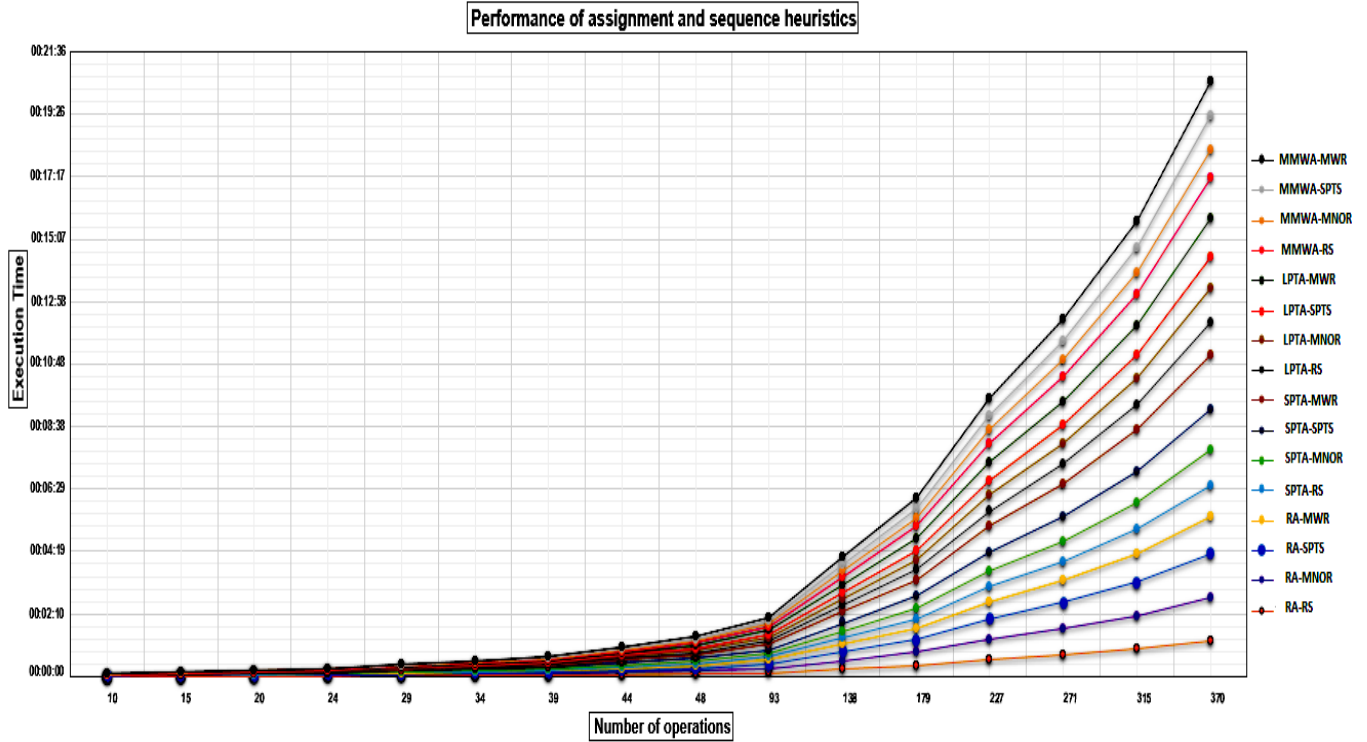


FIGURE 5.3 – Temps d'exécution du GA 2 avec les différentes combinaisons des heuristiques d'affectation et de séquençement.

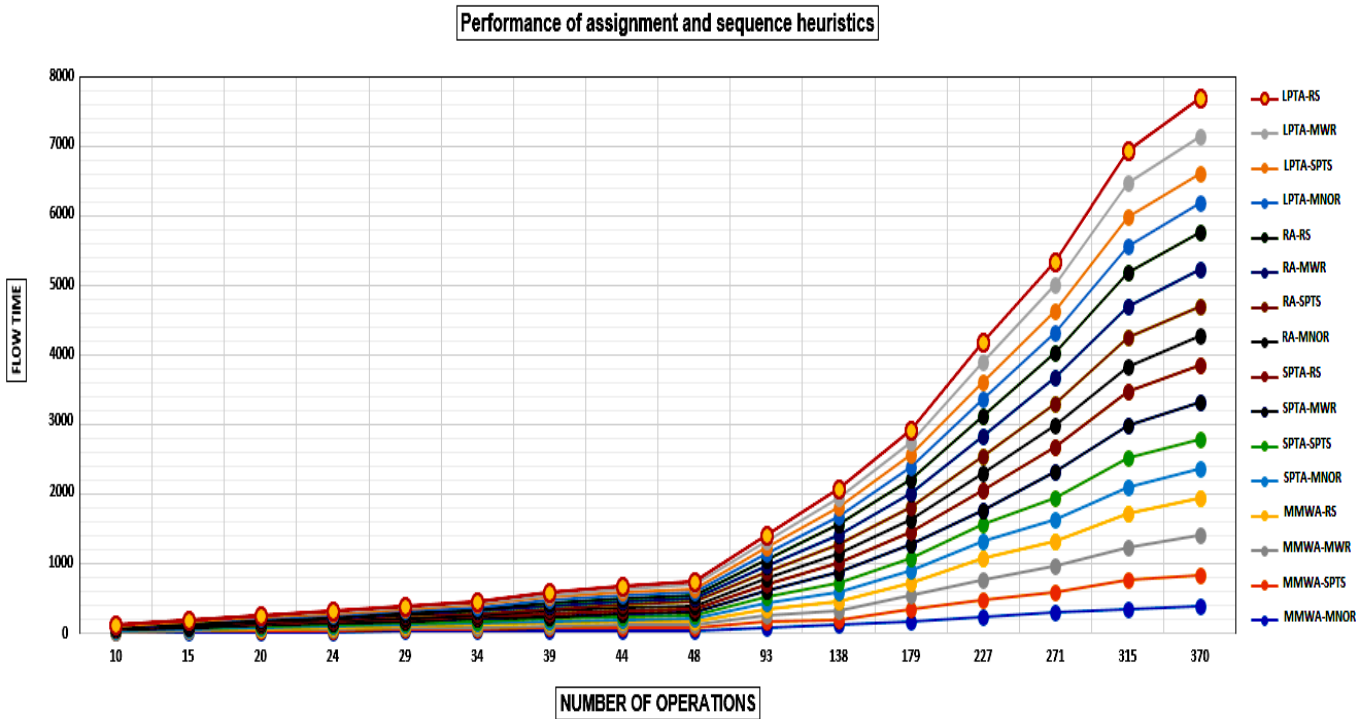


FIGURE 5.4 – Évolution de la fonction fitness  $\sum_i C_i$  dans GA 2 avec les différentes combinaisons des heuristiques d'affectation et de séquençement.

Résultats des algorithmes de recherche locale itérative

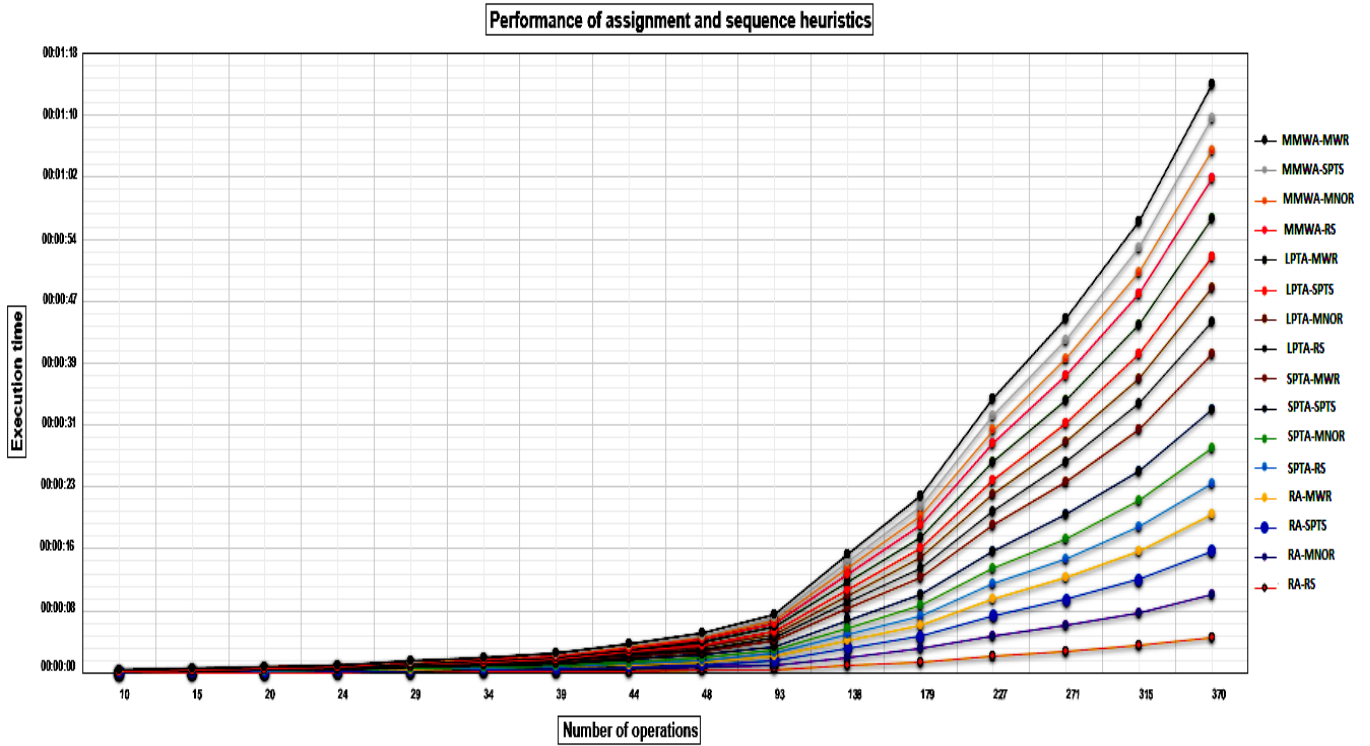


FIGURE 5.5 – Temps d'exécution de ILS 1 avec les différentes combinaisons des heuristiques d'affectation et de séquenement.

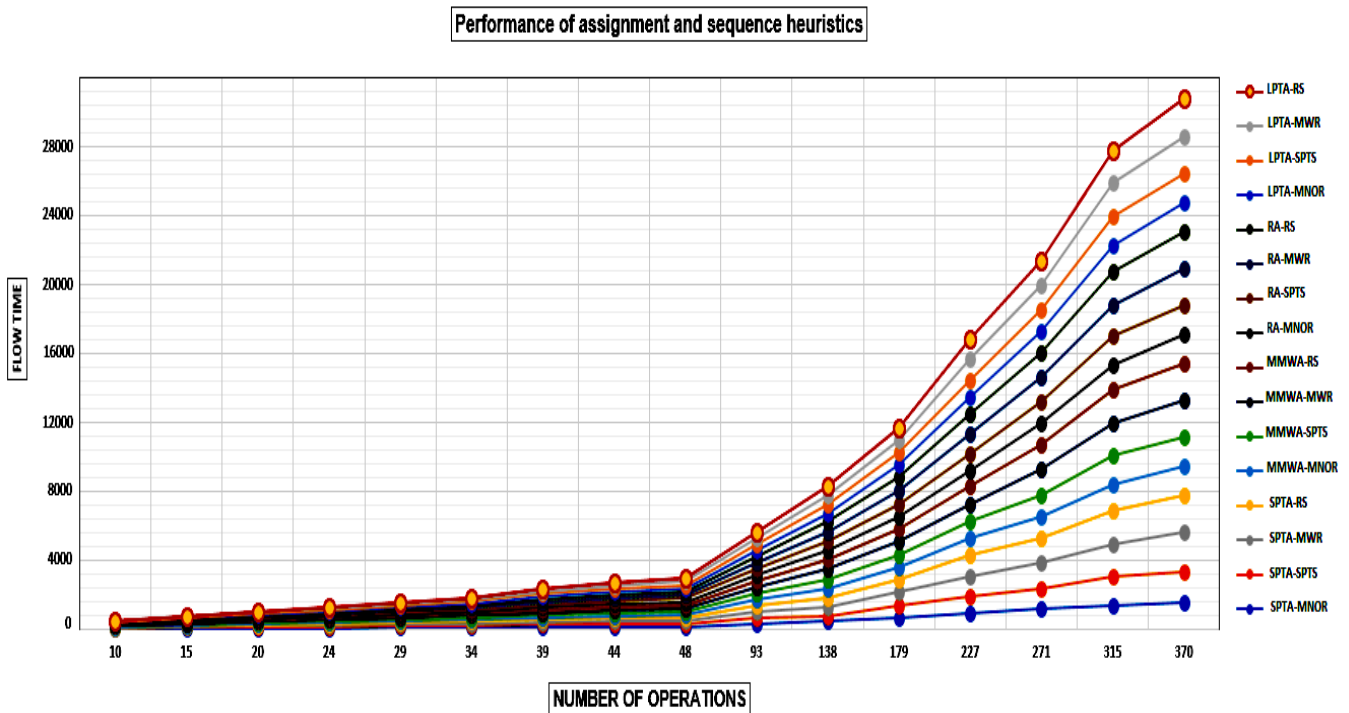


FIGURE 5.6 – Évolution de la fonction objective  $\sum_i C_i$  dans ILS 1 avec les différentes combinaisons des heuristiques d'affectation et de séquenement.

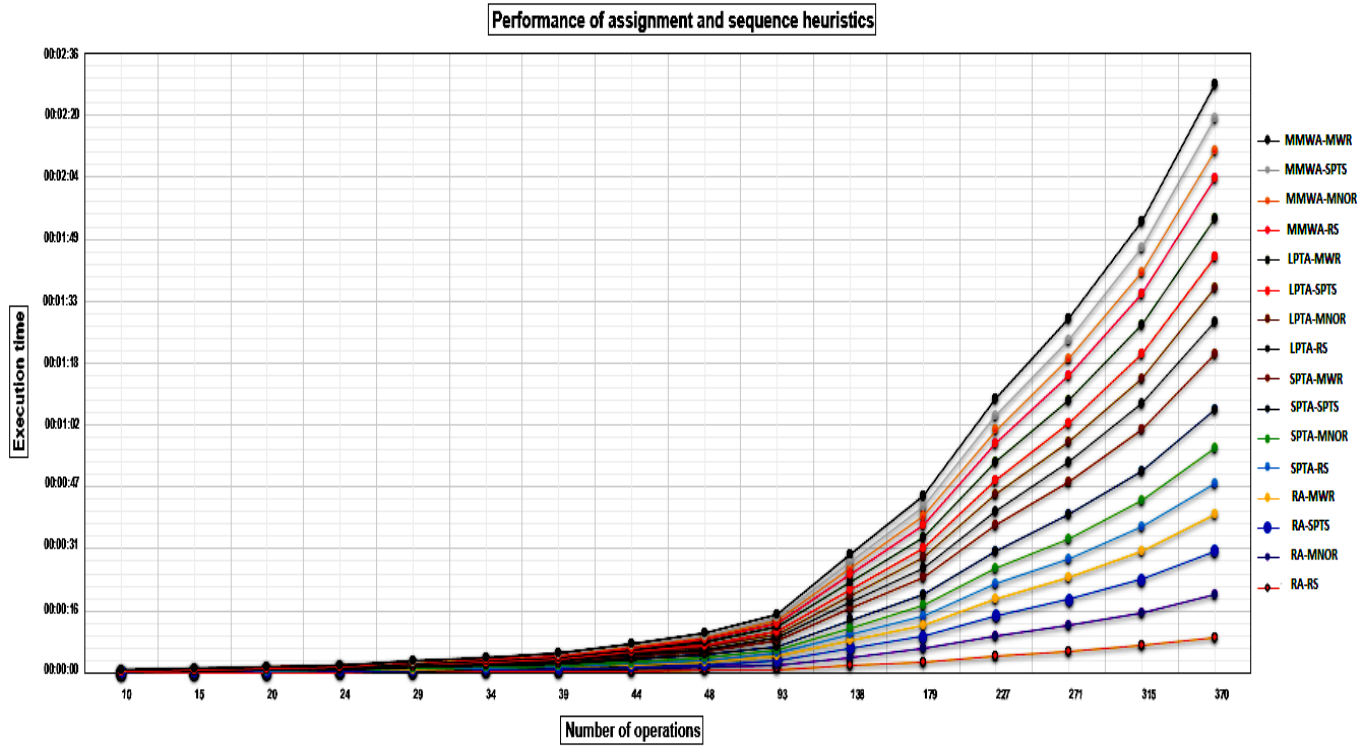


FIGURE 5.7 – Temps d'exécution de ILS 2 avec les différentes combinaisons des heuristiques d'affectation et de séquençement.

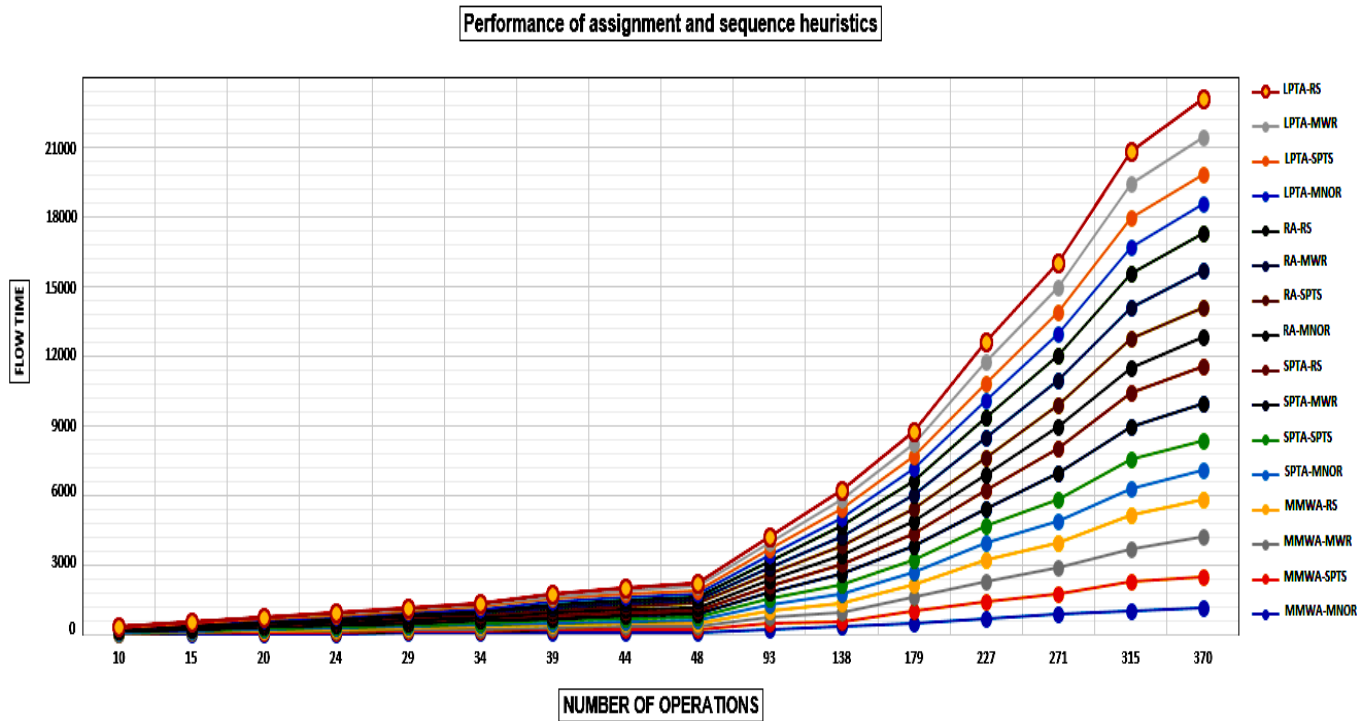


FIGURE 5.8 – Évolution de la fonction objective  $\sum_i C_i$  dans ILS 2 avec les différentes combinaisons des heuristiques d'affectation et de séquençement.



## 5.4 Évaluation de performance des opérateurs développés

Cette sous-section présente les résultats des pourcentages d'amélioration des opérateurs de croisement des algorithmes génétiques, ainsi que les opérateurs d'affectation et de séquençement des algorithmes de recherche locale itérative. Le but est d'évaluer la performance de ces opérateurs pour chaque algorithme.

Les pourcentages d'amélioration des opérateurs ont été évalués pour les algorithmes avec les mêmes solutions initiales et les mêmes paramètres sur 150 instances de plusieurs types : instances réelles du CHT, instances générées aléatoirement de type CHT et instances générées aléatoirement de tailles différentes. Pour chaque instance, le minimum, la moyenne et le maximum des pourcentages d'amélioration des opérateurs ont été évalués. Les pourcentages d'amélioration au début, au centre et à la fin des algorithmes pour chaque opérateur, ainsi que le nombre de fois où chaque opérateur est appliqué dans les itérations de chaque algorithme ont été aussi calculés. Les figures ci-dessous présentent les résultats des pourcentages d'amélioration des opérateurs de croisement d'affectation (Figures 5.9, 5.10, 5.11), et de séquençement (Figures 5.12, 5.13, 5.14 5.15) des algorithmes génétiques, et des opérateurs AO (Figures 5.18, 5.20, 5.22) et SO (Figures 5.19, 5.21 et 5.23) des algorithmes de recherche locale itérative. Les performances des algorithmes de la recherche locale (Figure 5.16, 5.17) ont été aussi évalués afin de mettre en évidence l'évolution de leurs pourcentages d'amélioration avec les différents opérateurs des algorithmes génétiques.

Il est important de noter que les pourcentages d'amélioration des opérateurs des AGs et des ILSs dépendent des types d'instances et de leurs tailles. À partir de ces résultats, on remarque que les pourcentages d'amélioration des opérateurs d'affectation OMAC sont importants par rapport à ceux des opérateurs de croisement JLOSC et SLOSC. Néanmoins, les algorithmes génétiques convergent vers de meilleures solutions avec la combinaison des différents opérateurs d'affectation et de séquençement. Concernant les opérateurs des méthodes de recherche locale itérative, les résultats montrent que les opérateurs AO sont plus performants que ceux des opérateurs SO. Cependant, comme les algorithmes génétiques, la convergence vers de bonnes solutions nécessite la combinaison des opérateurs d'affectation et de séquençement.

### Opérateurs des algorithmes génétiques

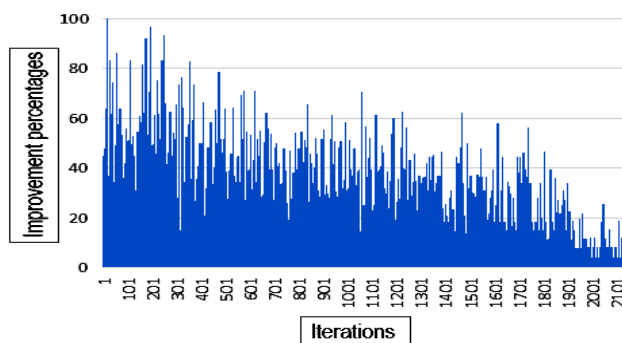


FIGURE 5.9 – Opérateur de croisement OMAC 1.



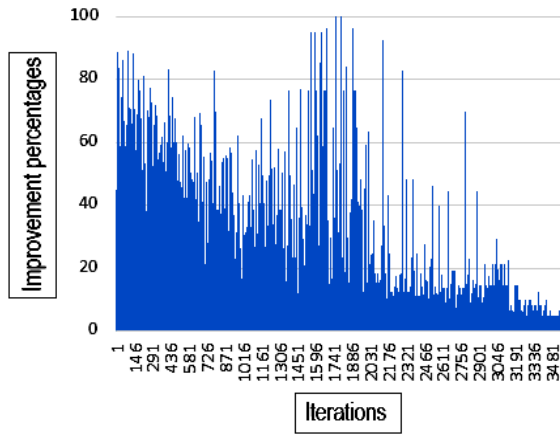


FIGURE 5.10 – Opérateur de croisement OMAC 2.

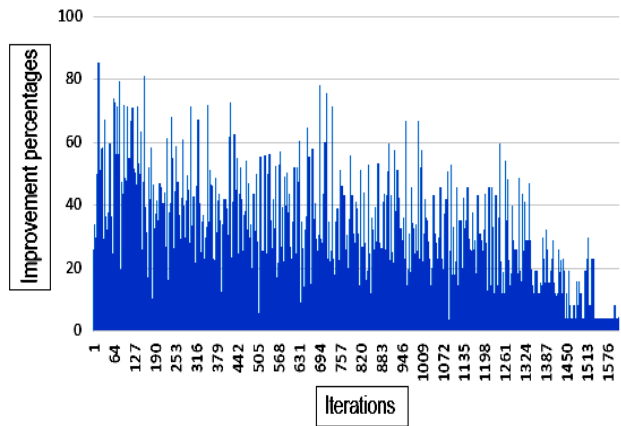


FIGURE 5.11 – Opérateur de croisement OMAC 3.

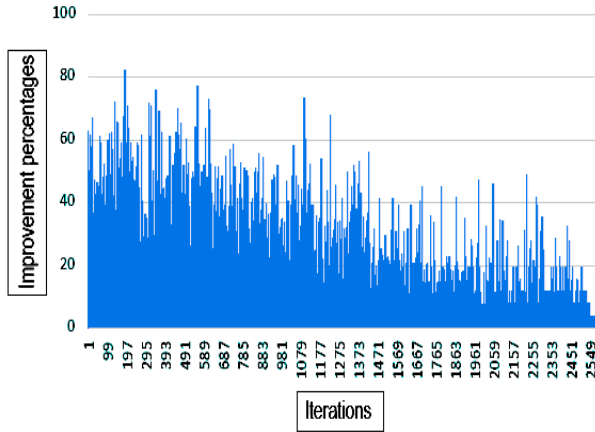


FIGURE 5.12 – Opérateur de croisement JLOSC 1.

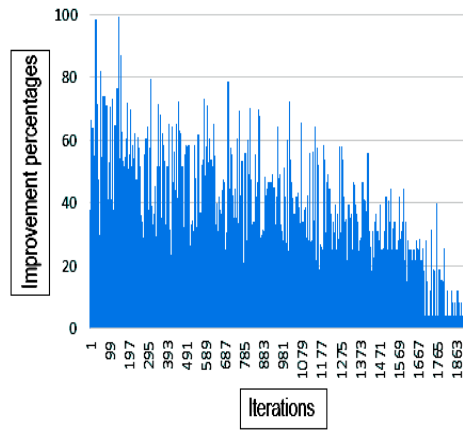


FIGURE 5.13 – Opérateur de croisement JLOSC 2.

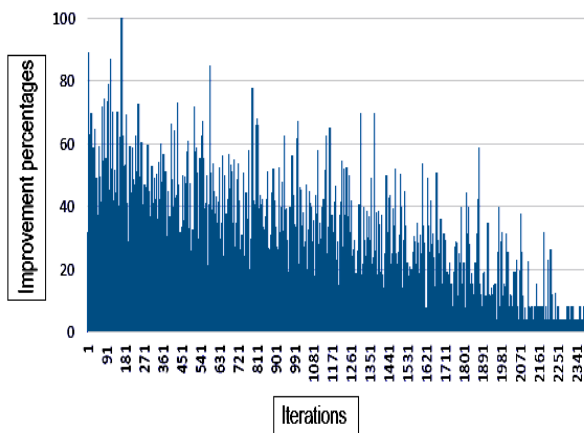


FIGURE 5.14 – Opérateur de croisement SLOSC 1.

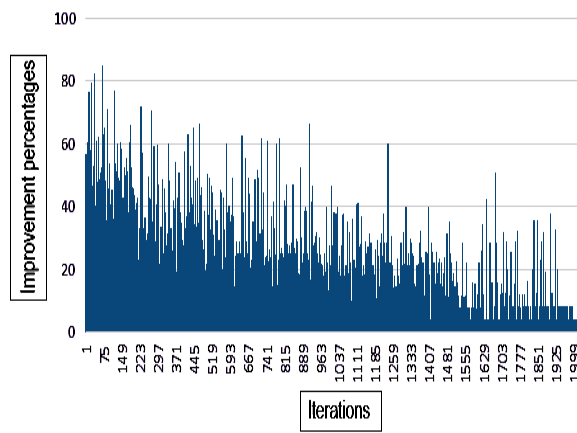


FIGURE 5.15 – Opérateur de croisement SLOSC 2.

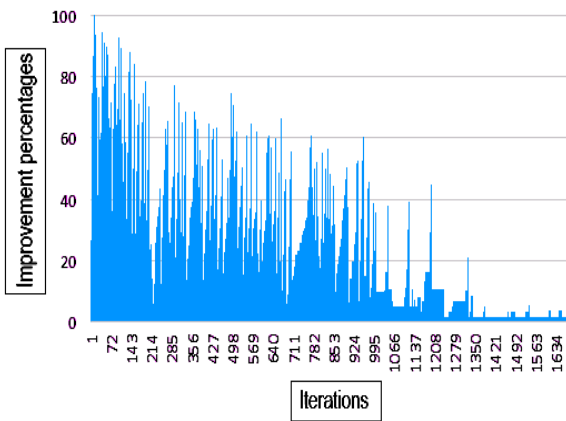


FIGURE 5.16 – Recherche locale avec OMAC 1, JLOSC 1 et SLOSC 1.

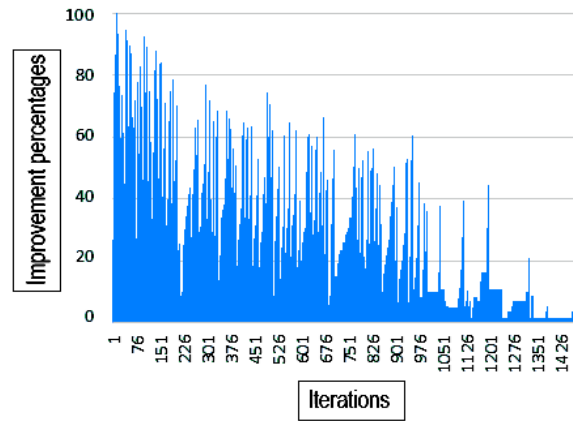


FIGURE 5.17 – Recherche locale avec OMAC 3, JLOSC 2 et SLOSC 2.

### Opérateurs des algorithmes de recherche locale itérative

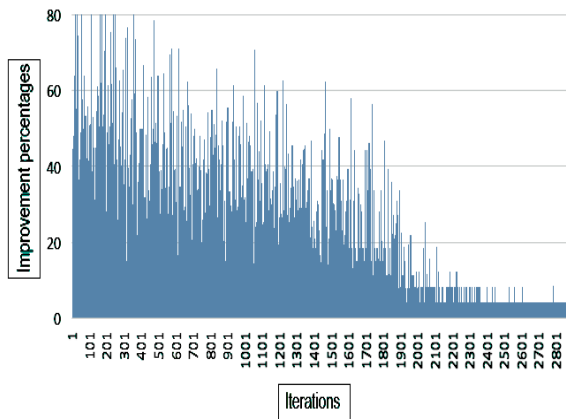


FIGURE 5.18 – Opérateur d'affectation AO 1.

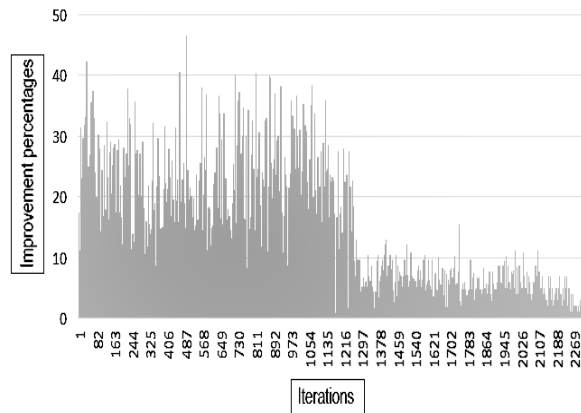


FIGURE 5.19 – Opérateur d'affectation SO 1.

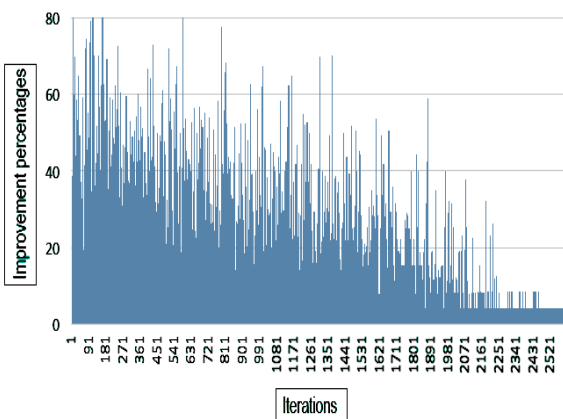


FIGURE 5.20 – Opérateur d'affectation AO 2.

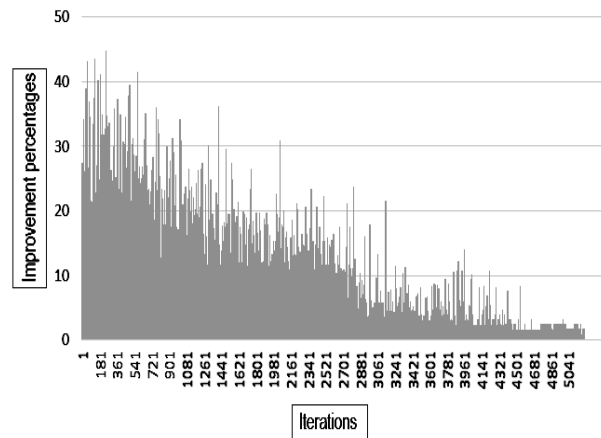


FIGURE 5.21 – Opérateur de séquence SO 2.

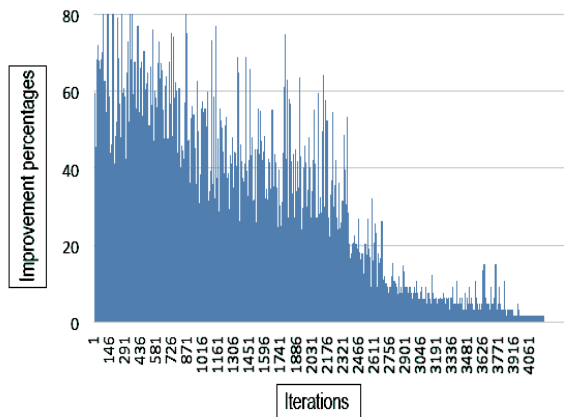


FIGURE 5.22 – Opérateur de séquence AO 3.

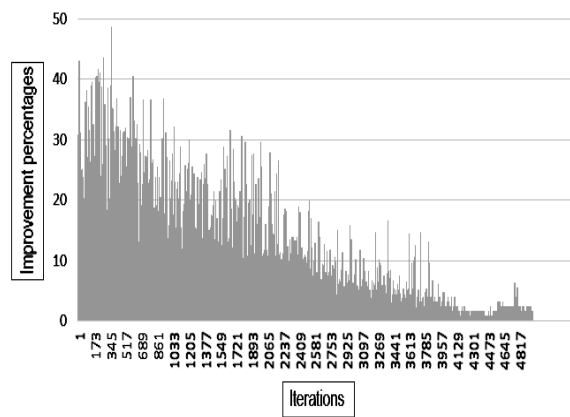


FIGURE 5.23 – Opérateur de séquence SO 3.

## 5.5 Optimisation et réglage des paramètres par des plans d'expériences de Taguchi

Le choix des paramètres optimaux a un effet important sur l'efficacité des algorithmes métaheuristiques. Lorsque le nombre de facteurs affectant la performance des algorithmes est plus important, l'expérience factorielle et l'approche exhaustive pour étudier l'effet des différents paramètres deviennent de plus en plus compliquées et peu pratiques.

Dans ce travail, la méthode de Taguchi est utilisée pour optimiser les paramètres des métaheuristiques développées. Les paramètres d'une métaheuristique devant être optimisés agissent comme des facteurs contrôlables dans le plan d'expériences "Design Of Experiments" (DOE). L'objectif est de trouver une combinaison optimale des paramètres, de sorte que le critère d'optimisation étudié, qui est le temps de séjour total des tâches dans le système de production soit minimisé. La méthode de Taguchi est un cas particulier du plan factoriel fractionné dans lequel des réseaux orthogonaux spéciaux sont utilisés (Roy [235]). Les réseaux orthogonaux de la méthode Taguchi permettent d'étudier un grand nombre de variables de décision avec un nombre limité d'expériences. Les variables de décision sont divisées en facteurs contrôlables et facteurs de bruit qui ne peuvent pas être contrôlés directement. Il est peu pratique et la plupart du temps impossible d'éliminer les facteurs de bruit (Dehnad [236]). Le plan d'expérience de Taguchi permet en effet de réduire l'impact de ces facteurs de bruit, et d'identifier ainsi les paramètres de facteurs de contrôle optimaux, tout en rendant le procédé robuste et résistant à la variation due aux facteurs de bruit.

La méthode de Taguchi est basée sur le concept du rapport signal/bruit afin de réduire l'effet des facteurs de bruit dans l'expérience. La valeur souhaitée ou la valeur de réponse moyenne est représentée par le signal (S), et la valeur indésirable ou l'écart-type est désignée par le bruit (N). La variation présente dans la variable de réponse ou la composante du facteur de bruit est représentée par le rapport S/N. Lorsque les valeurs d'un rapport signal/bruit (S/N) sont élevées, cela signifie que les paramètres des facteurs de contrôle limitent les effets des facteurs de bruit. Les fonctions

objectives sont classées en 3 types pour la conception des plans expérimentaux par la méthode de Taguchi. Il s'agit de : "le plus petit est meilleur", "le plus grand est meilleur" et "le nominal est meilleur". Puisque dans les métaheuristiques développées, l'objectif est de minimiser  $\sum_i C_i$ , le type "le plus petit est meilleur" est utilisé, son rapport S/N correspondant est donné par l'équation suivante :

$$\frac{S}{N} = -10 \log_{10}(k)^2, \quad (5.1)$$

où  $k$  est la valeur de la fonction objective.

Les paramètres de l'algorithme génétique sont : la taille de la population (PS), le nombre maximum de générations (MNG), la probabilité de croisement (Pc), la probabilité de mutation (Pm), le nombre d'individus élites ou le paramètre d'élitisme (NEI) et le nombre d'individus sur lesquels les méthodes de recherche locale sont appliquées (NILS).

Les paramètres de l'algorithme de recherche locale itérative sont : le nombre maximum d'itérations de l'opérateur de séquençement (MISO), le nombre maximum d'itérations de l'opérateur d'affectation (MIAO), le nombre maximum d'itérations de la procédure de perturbation (MPPO) et le nombre maximal de perturbations de l'algorithme de recherche locale itérée (MPILS). Le plan de Taguchi basé sur des expériences factorielles fractionnées est utilisé pour définir les paramètres des algorithmes génétiques et des méthodes de recherche locale itérative.

Minitab 19 est utilisé pour la réalisation d'un plan d'expérience par la méthode Taguchi. Un plan à 5 niveaux et 6 facteurs est choisi, le tableau orthogonal L25 est utilisé. Ce tableau orthogonal répertorie les différentes combinaisons de facteurs à différents niveaux auxquels les valeurs de réponse des expériences doivent être déterminées.

Pour trouver la meilleure configuration des paramètres des AGs et des ILSs, des plans d'expériences ont été réalisés sur 50 instances. Ces instances sont de types différents : instances réelles du CHT, instances générées aléatoirement de type CHT et instances générées aléatoirement. Pour chaque catégorie, des instances de petite, moyenne et de grande taille ont été testées. Le but est de trouver la meilleure configuration des paramètres quel que soit le type et la taille des instances. Les résultats obtenus par le plan de Taguchi sur une instance réelle du CHT de grande taille sont détaillés et représentés dans ce qui suit.

Pour chaque instance et pour les différentes combinaisons des niveaux de facteurs, chaque configuration est résolue cinq fois et la réponse moyenne a été utilisée dans l'analyse. Les Figures 5.24, 5.26, 5.28 et 5.30, montrent l'évolution de la fonction objective  $\sum_i C_i$  en fonction des différents niveaux de paramètres des algorithmes, où les paramètres optimaux sont définis par la configuration avec une fonction objective minimale. Les rapports S/N correspondant sont représentés dans les Figures 5.25, 5.27, 5.29 et 5.31. Les valeurs optimales des paramètres des métaheuristiques sont présentées dans les Tables 5.5, 5.6, 5.11 et 5.12. Ces configurations de paramètres représentent les configurations avec une fonction objective minimale et un rapport S/N maximal dans les Tables 5.3, 5.4, 5.9 et 5.10.

Résultats des plans d'expérience de Taguchi : algorithmes génétiques

Level	PS	MNG	NEI	NILS	Pc	Pm
1	100	500	1	1	0.1	0.1
2	200	600	50	50	0.2	0.2
3	500	800	100	100	0.7	0.3
4	800	1000	500	500	0.8	0.8
5	1000	1200	1000	1000	0.9	0.9

TABLE 5.1 – Paramètres du GA 1 et niveaux du plan de Taguchi.

Level	PS	MNG	NEI	NILS	Pc	Pm
1	100	500	1	1	0.1	0.1
2	200	600	80	80	0.2	0.2
3	500	800	100	100	0.7	0.3
4	800	1000	500	500	0.8	0.8
5	1000	1200	1000	1000	0.9	0.9

TABLE 5.2 – Paramètres du GA 2 et niveaux du plan de Taguchi.

PS	MNG	NEI	NILS	Pc	Pm	Fitness	S/N ratio
100	500	1	1	0.9	0.1	990.2	-59.914
100	600	100	1	0.8	0.2	988.9	-59.903
100	800	100	100	0.7	0.3	987.7	-59.892
100	1000	50	100	0.8	0.1	987.2	-59.888
100	1200	100	50	0.9	0.2	987.4	-59.889
200	500	50	100	0.8	0.9	997.7	-59.979
200	600	100	50	0.9	0.1	989.8	-59.910
200	800	50	100	0.1	0.2	1000.1	-60.000
200	1000	100	1	0.2	0.7	997.5	-59.978
200	1200	1	50	0.7	0.8	998.3	-59.985
500	500	100	500	0.2	0.8	1004.9	-60.042
500	600	500	1	0.7	0.9	998.9	-59.990
500	800	500	100	0.9	0.1	987.1	-59.887
500	1000	50	50	0.8	0.2	986.8	-59.884
500	1200	50	500	0.1	0.7	999.2	-59.993
800	500	500	50	0.9	0.7	997.2	-59.975
800	600	500	100	0.1	0.8	1005.8	-60.050
800	800	1	500	0.2	0.9	999.1	-59.992
800	1000	50	500	0.7	0.1	987.3	-59.888
800	1200	50	50	0.9	0.3	987.1	-59.887
1000	500	1000	500	0.7	0.2	987.4	-59.889
1000	600	1	1000	0.8	0.7	994.6	-59.952
1000	800	50	1	0.9	0.8	995.8	-59.963
1000	1000	100	50	0.1	0.2	1004.6	-60.039
1000	1200	500	100	0.2	0.1	1003.5	-60.030

TABLE 5.3 – Résultats expérimentaux du plan de Taguchi GA 1.

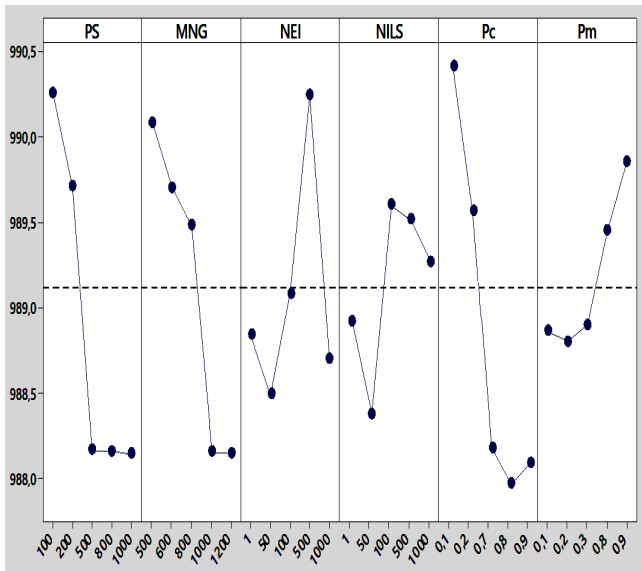


FIGURE 5.24 – Graphique des effets principaux de  $\sum_i C_i$  dans GA 1.

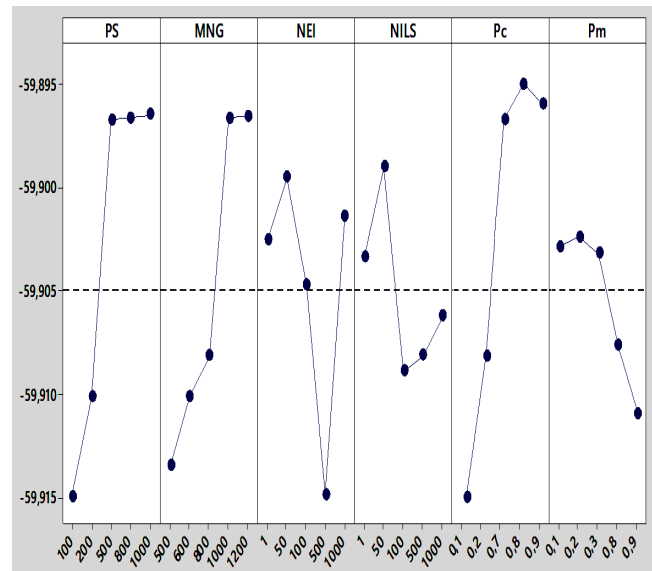


FIGURE 5.25 – Graphique des effets principaux de S/N dans GA 1.

PS	MNG	NEI	NILS	Pc	Pm	Fitness	S/N ratio
100	500	1	1	0.9	0.1	989.2	-59.905
100	600	100	1	0.8	0.2	987.5	-59.890
100	800	100	100	0.7	0.3	986.9	-59.885
100	1000	80	100	0.8	0.1	986.7	-59.883
100	1200	100	80	0.9	0.2	986.8	-59.884
200	500	80	100	0.8	0.9	996.4	-59.968
200	600	100	80	0.9	0.1	988.6	-59.900
200	800	80	100	0.1	0.2	999.7	-59.997
200	1000	100	1	0.2	0.7	996.2	-59.966
200	1200	1	80	0.7	0.8	997.4	-59.977
500	500	100	500	0.2	0.8	1003.5	-60.030
500	600	500	1	0.7	0.9	997.3	-59.976
500	800	500	100	0.8	0.1	986.7	-59.883
500	1000	1	100	0.9	0.2	986.5	-59.881
500	1200	80	500	0.1	0.7	999.2	-59.993
800	500	500	80	0.9	0.7	996.7	-59.971
800	600	500	100	0.1	0.8	1004.6	-60.039
800	800	1	500	0.2	0.9	998.8	-59.989
800	1000	80	500	0.7	0.1	986.5	-59.881
800	1200	80	80	0.8	0.2	986.3	-59.880
1000	500	1000	500	0.7	0.2	986.7	-59.883
1000	600	1	1000	0.8	0.7	993.8	-59.945
1000	800	80	1	0.9	0.8	994.6	-59.952
1000	1000	100	80	0.1	0.9	1003.4	-60.029
1000	1200	500	100	0.2	0.1	1002.2	-60.019

TABLE 5.4 – Résultats expérimentaux du plan de Taguchi GA 2.

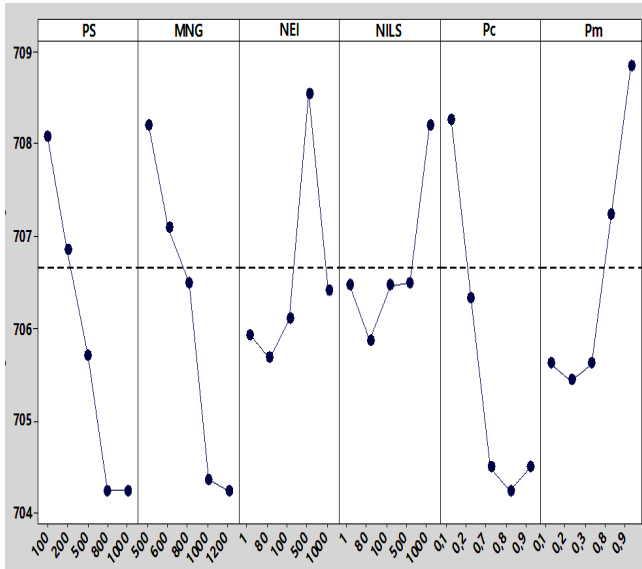


FIGURE 5.26 – Graphique des effets principaux de  $\sum_i C_i$  dans GA 2.

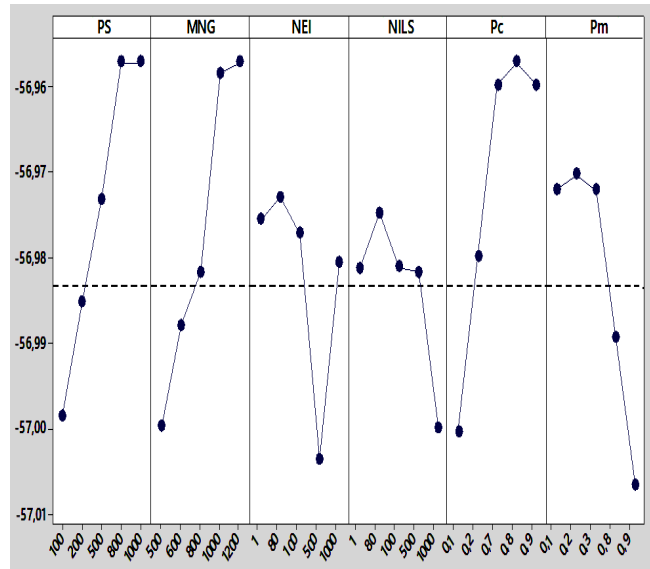


FIGURE 5.27 – Graphique des effets principaux de S/N dans GA 2.

PS	MNG	NEI	NILS	Pc	Pm
500	1000	50	50	0.8	0.2

TABLE 5.5 – Paramètres optimaux de GA 1.

PS	MNG	NEI	NILS	Pc	Pm
800	1200	80	80	0.8	0.2

TABLE 5.6 – Paramètres optimaux de GA 2.

Résultats des plans d'expérience de Taguchi : algorithmes de recherche locale itérative

Level	MPILS	MISO	MIAO	MPPO
1	500	100	100	50
2	600	200	200	100
3	800	500	500	200
4	1000	800	800	500
5	1200	1000	1000	800

TABLE 5.7 – Paramètres ILS 1 et niveaux du plan de Taguchi.

Level	MPILS	MISO	MIAO	MPPO
1	500	100	100	50
2	600	200	200	100
3	800	500	500	200
4	1000	800	800	500
5	1200	1000	1000	800

TABLE 5.8 – Paramètres ILS 2 et niveaux du plan de Taguchi.

MPILS	MISO	MIAO	MPPO	Flow time	S/N ratio
500	100	100	50	922.6	-59.301
500	200	500	50	921.1	-59.286
500	500	500	200	919.8	-59.273
500	800	200	200	919.2	-59.268
500	1000	500	100	919.4	-59.270
600	100	200	200	931.3	-59.381
600	200	500	100	922.2	-59.296
600	500	200	200	934.0	-59.407
600	800	500	50	931.0	-59.379
600	1000	100	100	932.0	-59.388
800	100	500	500	939.5	-59.458
800	200	800	50	932.6	-59.394
800	500	800	200	919.1	-59.267
800	800	200	100	932.9	-59.396
800	1000	200	800	933.0	-59.397
1000	100	800	100	930.7	-59.376
1000	200	1000	200	940.6	-59.468
1000	100	100	50	918.2	-59.258
1000	800	200	500	919.3	-59.269
1000	1000	200	100	919.1	-59.267
1200	100	1000	500	919.4	-59.270
1200	200	100	800	927.7	-59.348
1200	200	200	100	929.1	-59.361
1200	800	500	50	939.2	-59.455
1200	1000	1000	200	937.9	-59.443

TABLE 5.9 – Résultats expérimentaux du plan de Taguchi ILS 1.

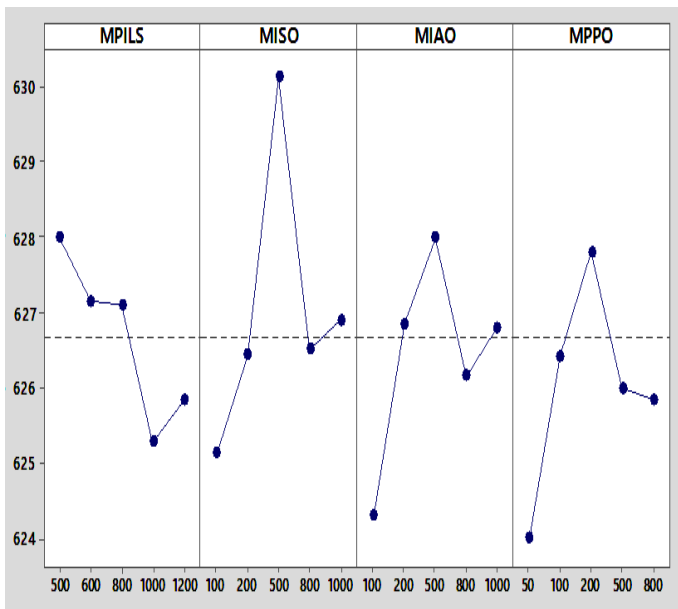


FIGURE 5.28 – Graphique des effets principaux de  $\sum_i C_i$  dans ILS 1.

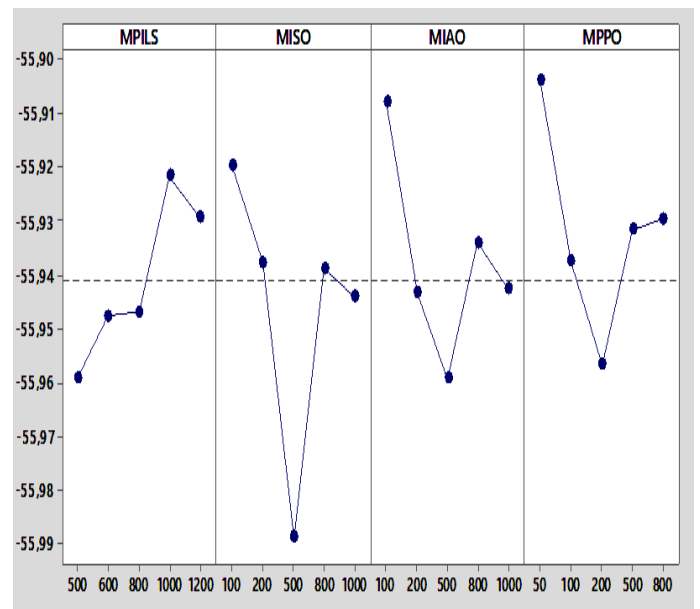


FIGURE 5.29 – Graphique des effets principaux de S/N dans ILS 1.



MPILS	MISO	MIAO	MPPO	Flow time	S/N ratio
500	100	100	50	908.4	-59.166
500	200	500	50	906.5	-59.147
500	500	500	200	906.9	-59.152
500	800	200	200	906.7	-59.149
500	1000	500	100	906.8	-59.150
600	100	200	200	916.7	-59.245
600	200	500	100	907.7	-59.159
600	500	200	200	920.5	-59.280
600	800	500	50	916.5	-59.242
600	1000	100	100	917.9	-59.255
800	100	500	500	924.9	-59.321
800	200	800	50	917.7	-59.254
800	500	800	200	906.5	-59.147
800	800	200	100	919.9	-59.275
800	1000	200	800	917.0	-59.248
1000	100	800	100	926.1	-59.333
1000	200	1000	200	919.5	-59.271
1000	100	100	50	906.5	-59.147
1000	800	200	500	906.3	-59.145
1000	1000	200	100	906.7	-59.149
1200	100	1000	500	913.7	-59.216
1200	200	100	800	914.6	-59.225
1200	200	200	100	905.5	-59.137
1200	800	500	50	924.7	-59.320
1200	1000	1000	200	923.4	-59.307

TABLE 5.10 – Résultats expérimentaux du plan de Taguchi ILS 2.

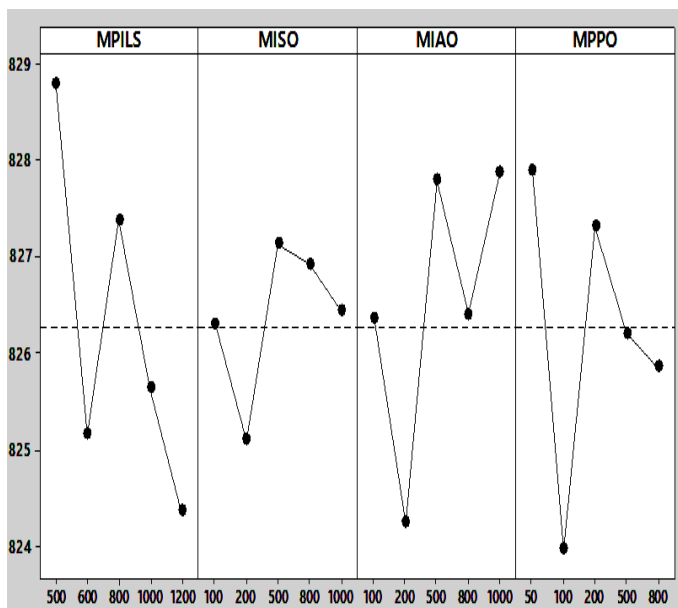


FIGURE 5.30 – Graphique des effets principaux de  $\sum_i C_i$  dans ILS 2.

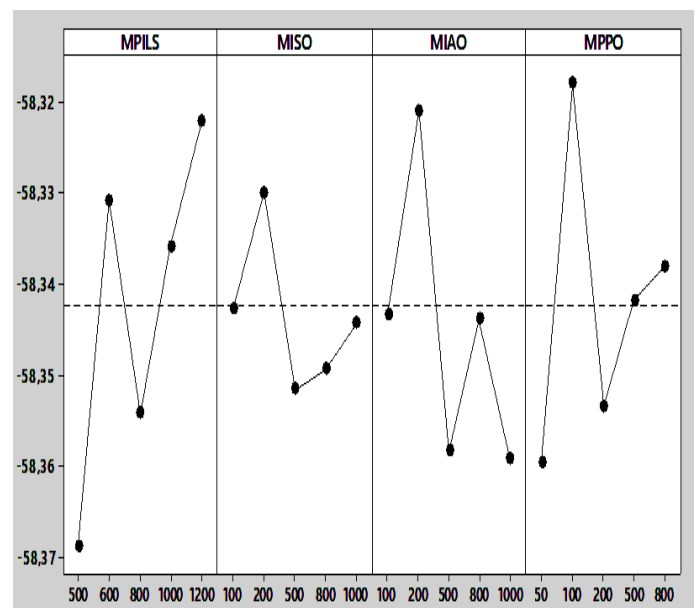


FIGURE 5.31 – Graphique des effets principaux de S/N dans ILS 2.

MPILS	MISO	MIAO	MPPO
1000	100	100	50

TABLE 5.11 – Paramètres optimaux ILS 1.

MPILS	MISO	MIAO	MPPO
1200	200	200	100

TABLE 5.12 – Paramètres optimaux ILS 2.

## 5.6 Caractéristiques du problème FJSP-SDST-JS-MTMR

Cette section a pour but de mettre en évidence les caractéristiques du problème FJSP-SDST-JS-MTMR à travers des exemples de problèmes de petites tailles et de présenter les résultats d’une étude sur l’impact du fractionnement des tâches en lots sur le critère d’optimisation étudié, ainsi que l’étude de performance des méthodes de résolutions développées.

### Exemple n°1

Considérons deux instances de petites tailles du problème étudié consistant à ordonnancer un ensemble de tâches dans un atelier de production de type job-shop flexible. Dans la première instance (Figure 5.32), le système de production est composé de 5 tâches et 2 machines, tandis que dans la deuxième instance (Figure 5.33), l’atelier de production est constitué de 2 tâches et 3 machines. Ces instances ont été résolues en utilisant le modèle mathématique et les algorithmes développés en considérant deux cas différents pour chaque exemple. Dans le premier cas, on a supposé que les tâches ne peuvent pas être fractionnées en lots i.e, chaque tâche est composée d’un seul lot, alors que dans le deuxième cas, on a supposé que le fractionnement des tâches en lots est autorisé, où le nombre de lots pour chaque tâche est indiqué dans les Figures 5.32 (b) et 5.33 (b). Les diagrammes de Gantt des plannings résultants des deux exemples sont présentés dans les figures suivantes.

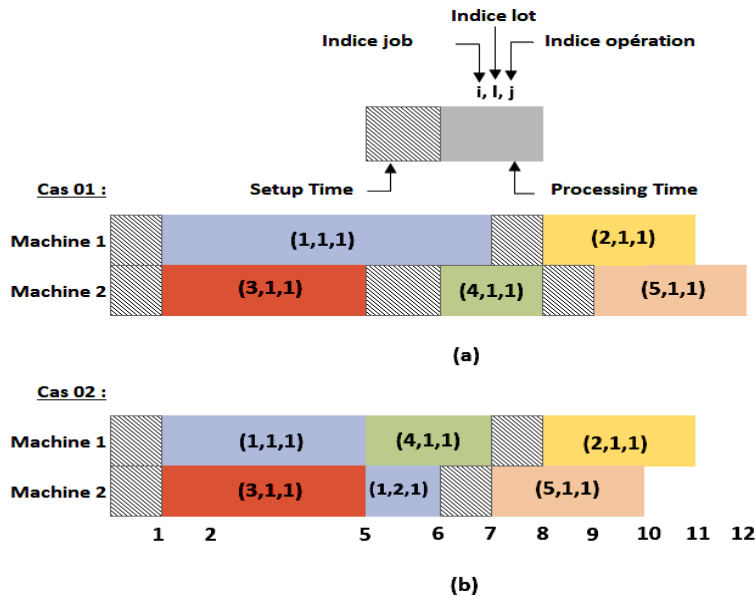


FIGURE 5.32 – Diagrammes de Gantt de la solution résultante du premier exemple.

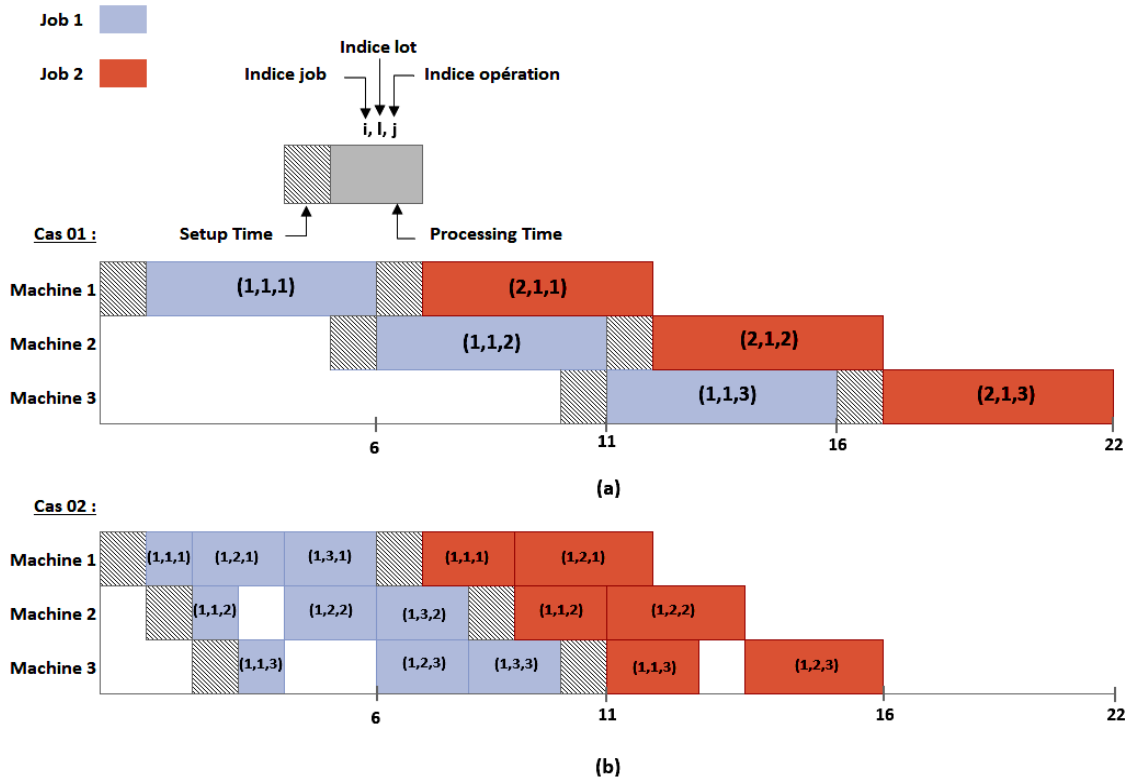


FIGURE 5.33 – Diagrammes de Gantt de la solution résultante du deuxième exemple.

D'après les résultats des exemples précédents, on constate que lorsque le fractionnement des tâches en lots n'est pas pris en compte, les fonctions objectives du premier et du deuxième exemple sont 43 (Figure 5.32 (a)) et 38 (Figure 5.33 (a)), respectivement. Dans le deuxième cas (Figures 5.32 (b) et 5.33 (b)), les problèmes ont été résolus à nouveau en fractionnant les tâches en lots. Dans le premier exemple, uniquement la tâche 1 est fractionnée en deux lots, et le nombre de lots pour les autres tâches reste inchangé tel que le premier cas, alors que dans le deuxième exemple, les deux tâches sont fractionnées en 3 lots. Dans le 2<sup>ème</sup> cas des deux exemples, des solutions ont été obtenues avec des fonctions objectives de 39 (Figure 5.32 (b)) et 26 (Figure 5.33 (b)), et qui représentent des réductions de 9.30 % et 31.58 %, respectivement, dans les critères d'optimisation par rapport au premier cas. À travers ces exemples, nous avons illustré que le fractionnement des tâches en lots considéré dans le cas du problème traité, permet non seulement de prendre en compte les contraintes du respect des capacités de machines en nombre de portions, mais permet également une amélioration significative dans le critère d'optimisation étudié. Le pourcentage d'amélioration dépend fortement du nombre de tâches fractionnées en lots et également du nombre de lots de chaque tâche. Ceci est illustré à travers l'exemple suivant.

## Exemple n°2

Dans les exemples précédents, nous avons démontré que le fractionnement des tâches en lots s'est avéré efficace pour les systèmes de production de type job shop flexible, et que le nombre de tâches fractionnées en lots a un impact important sur la qualité des solutions obtenues. Le présent exemple, qui est particulièrement rencontré avec des cas d'instances réelles du CHT, a pour but de montrer que le nombre de lots de chaque tâche et leurs tailles, ainsi que la présence des machines parallèles alternatives permettant de traiter les opérations des lots des tâches, ont également des effets considérables sur les solutions obtenues. Ces faits sont démontrés, en considérant deux instances de petites tailles du problème consistant à traiter 2 tâches dans un système de type job shop flexible, qui est composé de 3 machines non identiques dans la première instance et de 7 machines au total dans la deuxième instance, avec présence des machines alternatives pour une opération donnée, à la différence de la première instance. Les digrammes de Gantt des solutions résultantes pour les deux instances sans et avec le fractionnement des tâches en lots, sont présentés dans les Figures 5.34 et 5.35.

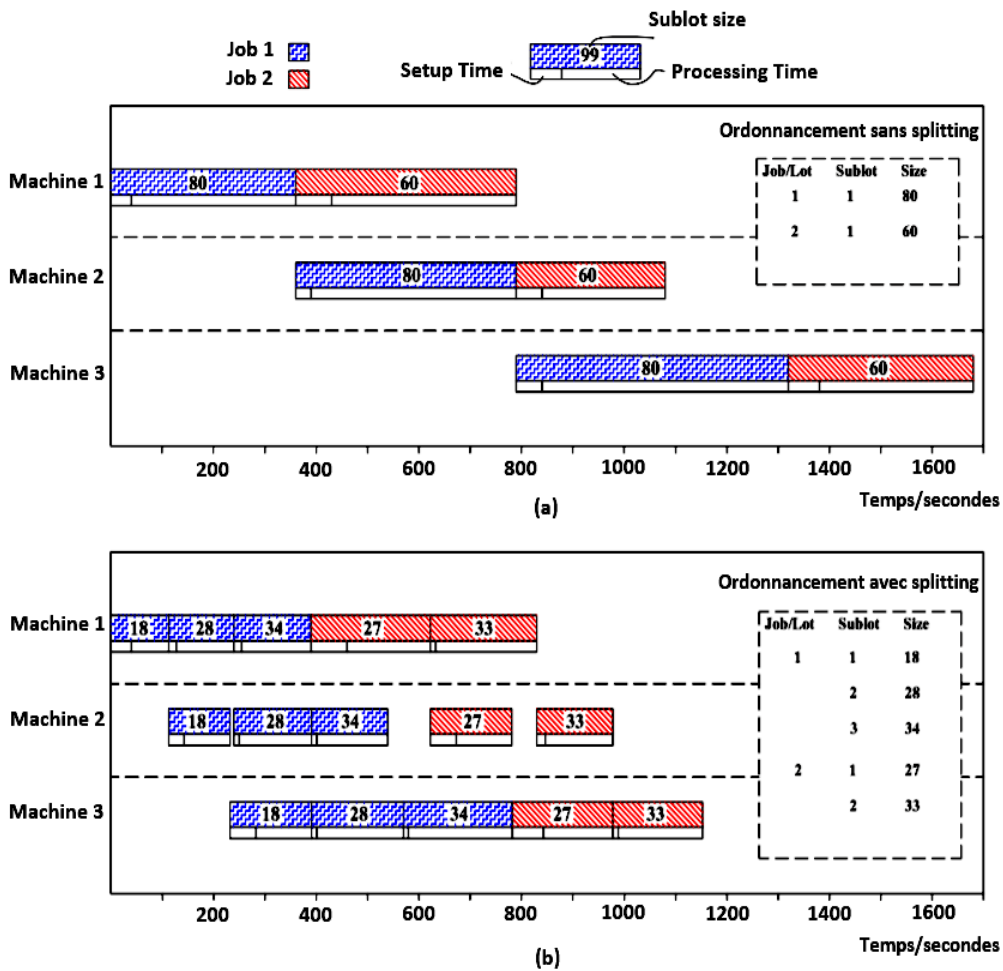


FIGURE 5.34 – Diagrammes de Gantt des solutions résultantes des deux cas considérés de la première instance.

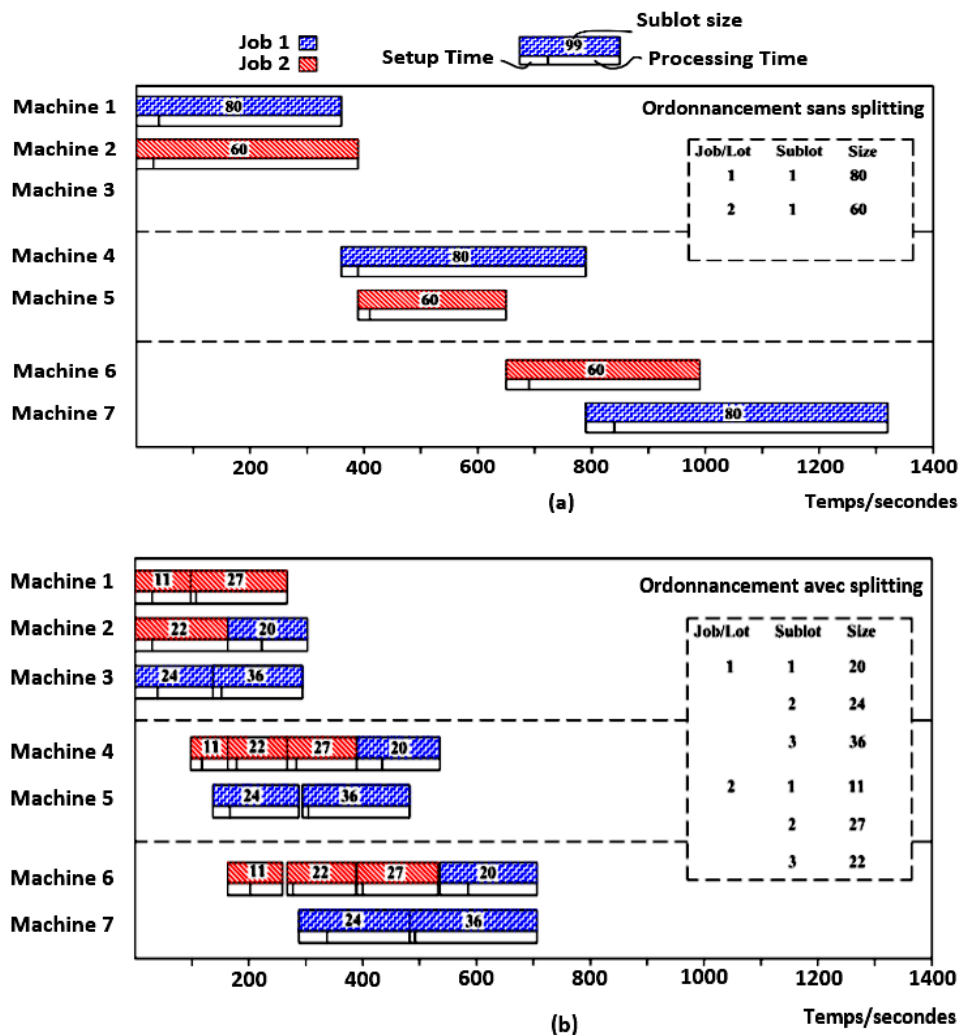


FIGURE 5.35 – Diagrammes de Gantt des solutions résultantes des deux cas considérés de la deuxième instance.

D'après les résultats précédents, on remarque que pour le cas de l'ordonnancement sans splitting, les solutions de la première (Figure 5.34 (a)) et la deuxième instance (5.34 (a)) sont 2980 et 2320 secondes, respectivement. Les solutions correspondantes pour le cas de l'ordonnancement avec splitting sont données dans les Figures 5.34 (b) et 5.35 (b) avec des fonctions objectives de 1952 et 1226 secondes, respectivement. Les pourcentages de réduction du critère d'optimisation dus au fractionnement des tâches en lots pour la première et la deuxième instance sont respectivement de 34.50 % et 47.15 %. Ces instances ont été résolues à plusieurs reprises en faisant varier le nombre de lots pour chaque tâche. Les fonctions objectives résultantes et les pourcentages de réduction obtenus sont représentés dans la Figure 5.36. D'après l'analyse de ces résultats, il a été constaté que les fonctions objectives de l'ordonnancement dans l'exemple de la deuxième instance sont faibles par rapport à celles de l'exemple de la première instance en raison de la présence de machines parallèles alternatives. Un résultat plus intéressant est illustré dans la Figure 5.36 (b), qui montre le pourcen-

tage de réduction de  $\sum_i C_i$ , en fonction du nombre de lots pour chaque tâche. La meilleure réduction de  $\sum_i C_i$  dans la première instance est de 36 % avec un nombre de lots de 6. Le pourcentage de réduction de  $\sum_i C_i$  reste stable au-delà de ce nombre de lots. La réduction maximale de la fonction objective dans la deuxième instance est de 54 %. Ce résultat est bien meilleur que celui obtenu avec l'exemple de la première instance. Ceci montre l'impact important du choix du nombre de lots des tâches et la présence de machines alternatives sur la qualité des solutions.

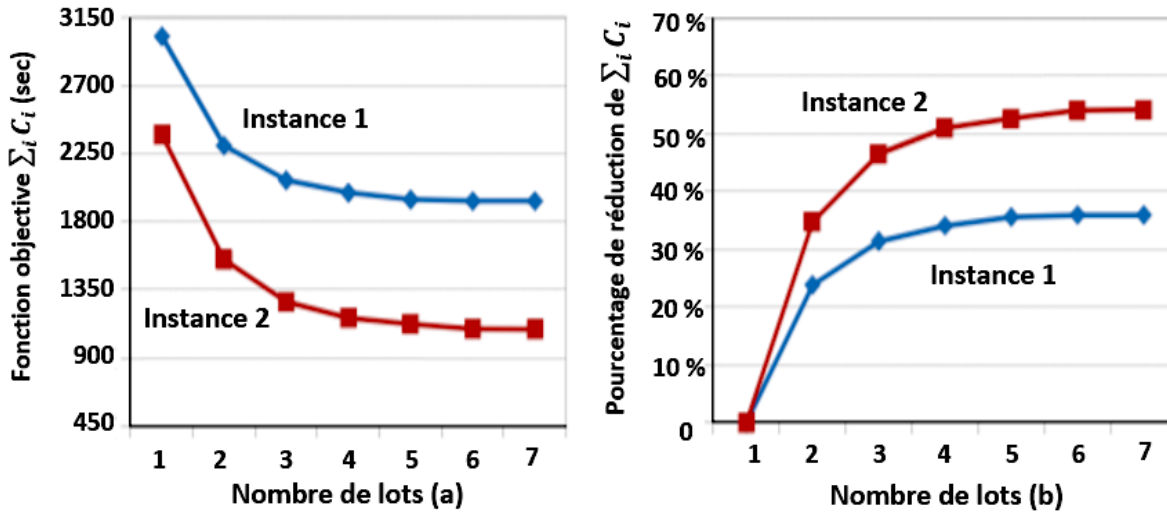


FIGURE 5.36 – Évolution de la fonction objective et le pourcentage de réduction de  $\sum_i C_i$  en fonction du nombre de lots.

### Exemple n°3

Afin de comparer les résultats obtenus avec le modèle mathématique présenté dans le chapitre 3 et l'algorithme génétique, un exemple du problème traité est étudié. Dans cet exemple, nous avons considéré un système avec 6 tâches et 4 machines, où chaque tâche est composée de deux opérations et un seul lot, et chaque opération peut être réalisée par une seule machine. Les données de ce problème sont fournies dans la Table 5.13.

Cet exemple a été résolu par le modèle mathématique et l'algorithme génétique. La Figure 5.39 présente les digrammes de Gantt des solutions obtenues. Le modèle mathématique a trouvé une solution optimale avec un flow time de valeur 579 secondes au bout de 8 secondes. Cette solution a été déclarée comme solution optimale après 23 secondes (voir la Figure 5.37). L'algorithme génétique a convergé ainsi vers la même solution à la 50<sup>ème</sup> itération après 2 secondes (voir la Figure 5.38) d'exécution avec un gap d'optimalité de zéro pour cent.

J	L	O	$(k, p_{ijk}, s_{ijk})$
1	1	1	(3, 15, 20)
		2	(1, 13, 20)
2	1	1	(4, 25, 20)
		2	(1, 24, 20)
3	1	1	(4, 30, 20)
		2	(2, 32, 20)
4	1	1	(4, 10, 20)
		2	(2, 40, 20)
5	1	1	(3, 14, 20)
		2	(1, 12, 20)
6	1	1	(3, 28, 20)
		2	(2, 22, 20)

$p_{ijk}$  : temps de traitement de l'opération  $j$  de la tâche  $i$  sur la machine  $k$ ,  
 $s_{ijk}$  : setup time de la machine  $k$  après la réalisation de l'opération  $j$  de la tâche  $i$

TABLE 5.13 – Exemple de cas avec 6 tâches et 4 machines.

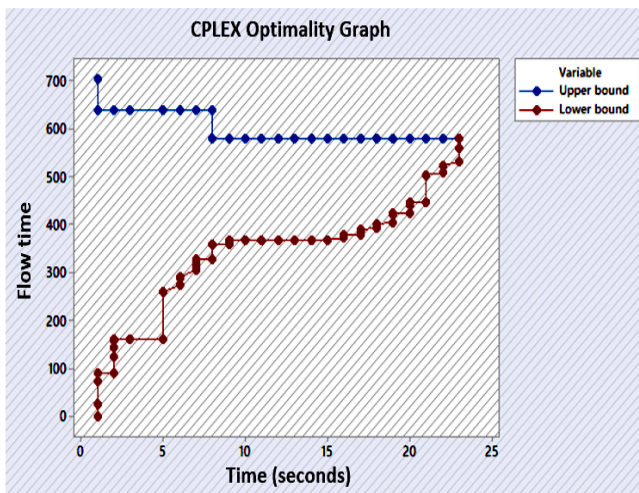


FIGURE 5.37 – Solution Cplex de l'instance avec 6 tâches et 4 machines.

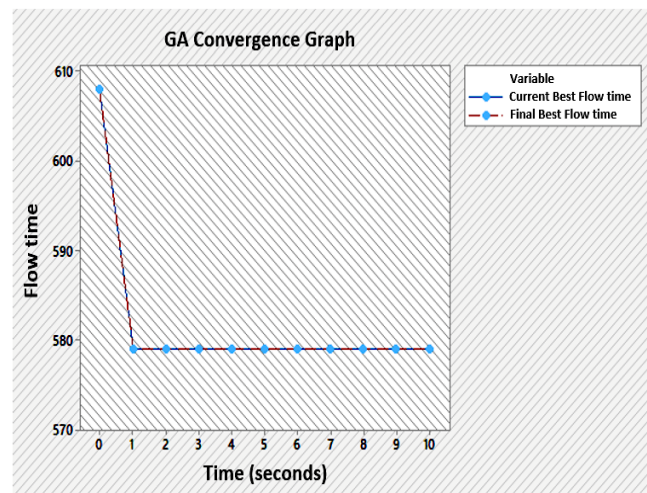


FIGURE 5.38 – Graphe de convergence du GA de l'instance avec 6 tâches et 4 machines.



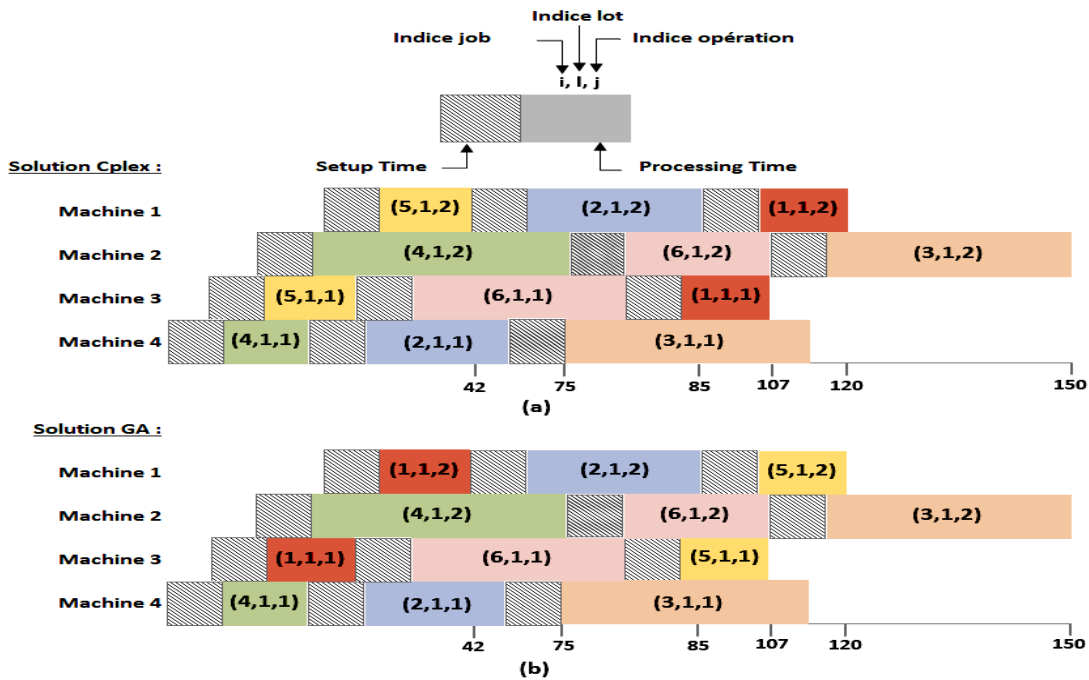


FIGURE 5.39 – Digrammes de Gantt des solutions résultantes avec Cplex et GA.

À travers ces résultats, on peut déduire que Cplex et l'AG ont convergé vers la même solution avec les mêmes affectations des opérations aux machines. Les séquences des opérations des tâches sur les machines sont identiques dans les deux solutions, à l'exception de la séquence des opérations sur la machine 1, où l'opération (5,1,2) est réalisée avant l'opération (1,1,2) dans la solution obtenue avec le modèle mathématique, tandis que l'opération (1,1,2) est réalisée avant l'opération (5,1,2) dans la solution obtenue avec GA, et de même pour les opérations (1,1,1) et (5,1,1) sur la machine 3.

#### Exemple n°4

Pour illustrer d'avantage le comportement et l'effectivité de l'algorithme génétique pour la résolution des instances avec des tailles importantes du problème étudié, deux instances réelles du CHT de moyenne et de grande taille sont considérées. L'instance de moyenne taille est composée de 10 tâches, 48 opérations et 29 machines, et l'instance de grande taille est constituée de 20 tâches, 93 opérations et 29 machines. Les deux instances ont été résolues avec le modèle mathématique et l'algorithme génétique afin de comparer les résultats obtenus. Pour l'instance de moyenne taille, l'AG a été capable de converger vers une solution en 2 secondes avec un flow time correspondant de 85 heures (Figure 5.40). Une solution a été trouvée également avec l'AG après 30 secondes pour l'instance de grande taille (Figure 5.41), tandis que le modèle mathématique n'a pas réussi à converger vers les solutions optimales pour les deux instances après plus de 3 heures d'exécution. Les Figures 5.42 et 5.43 présentent les diagrammes de Gantt des solutions obtenues avec l'AG pour ces deux instances.



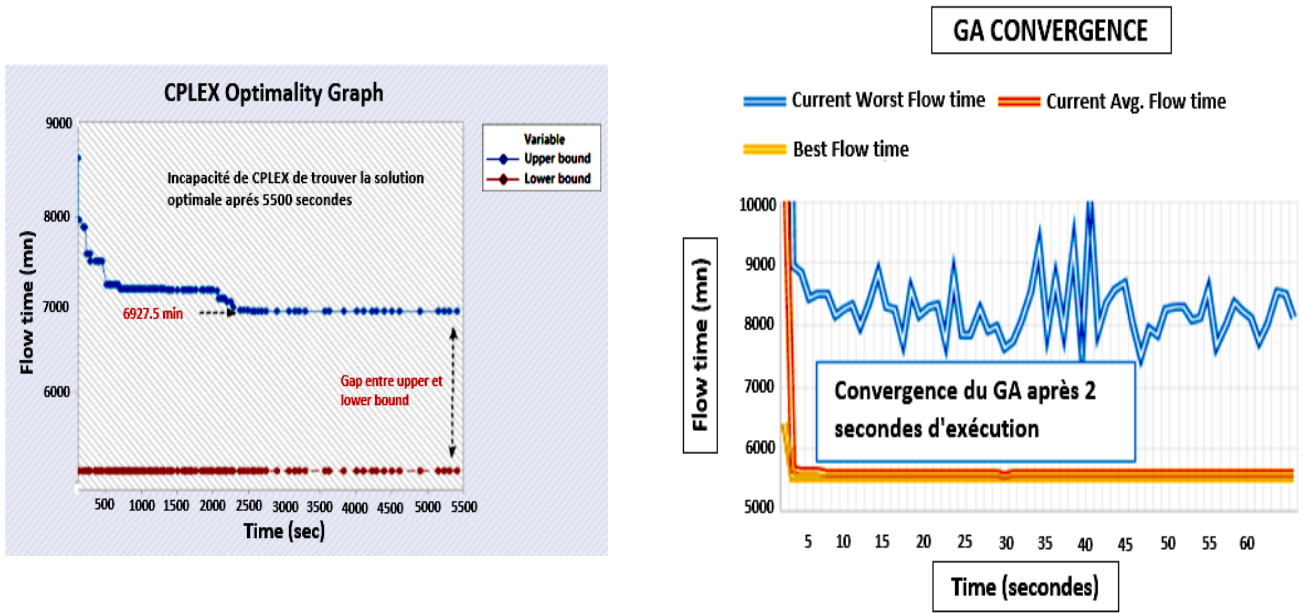


FIGURE 5.40 – Comportement de convergence de Cplex et de l'AG sur l'instance avec 10 tâches, 48 opérations et 29 machines.

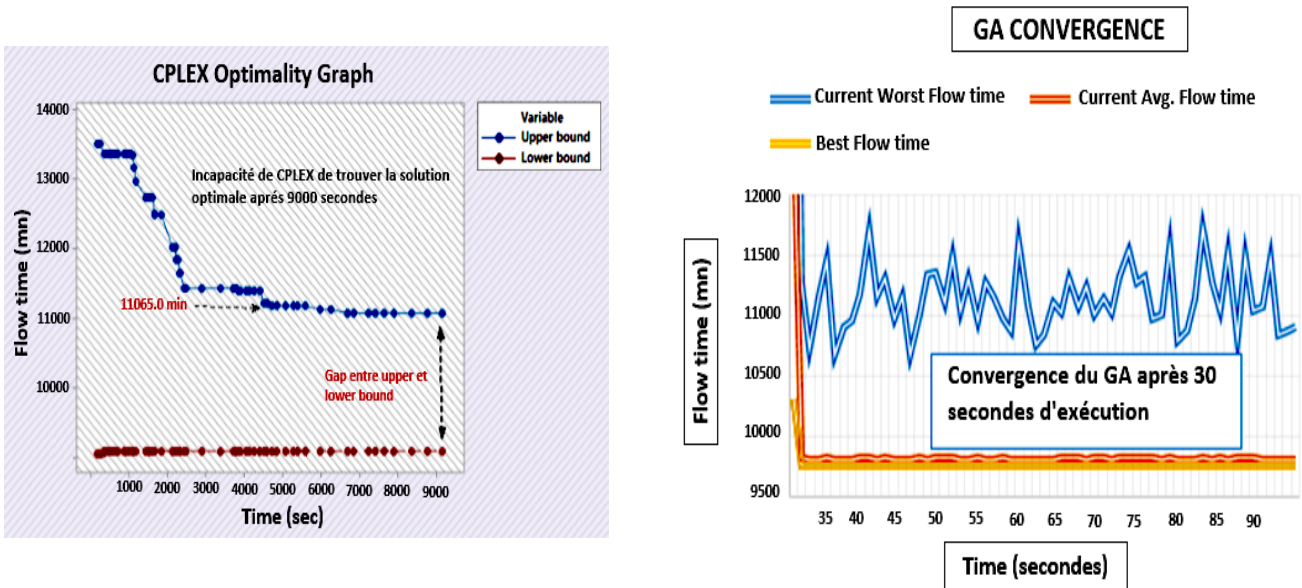


FIGURE 5.41 – Comportement de convergence de Cplex et de l'AG sur l'instance avec 20 tâches, 93 opérations et 29 machines.

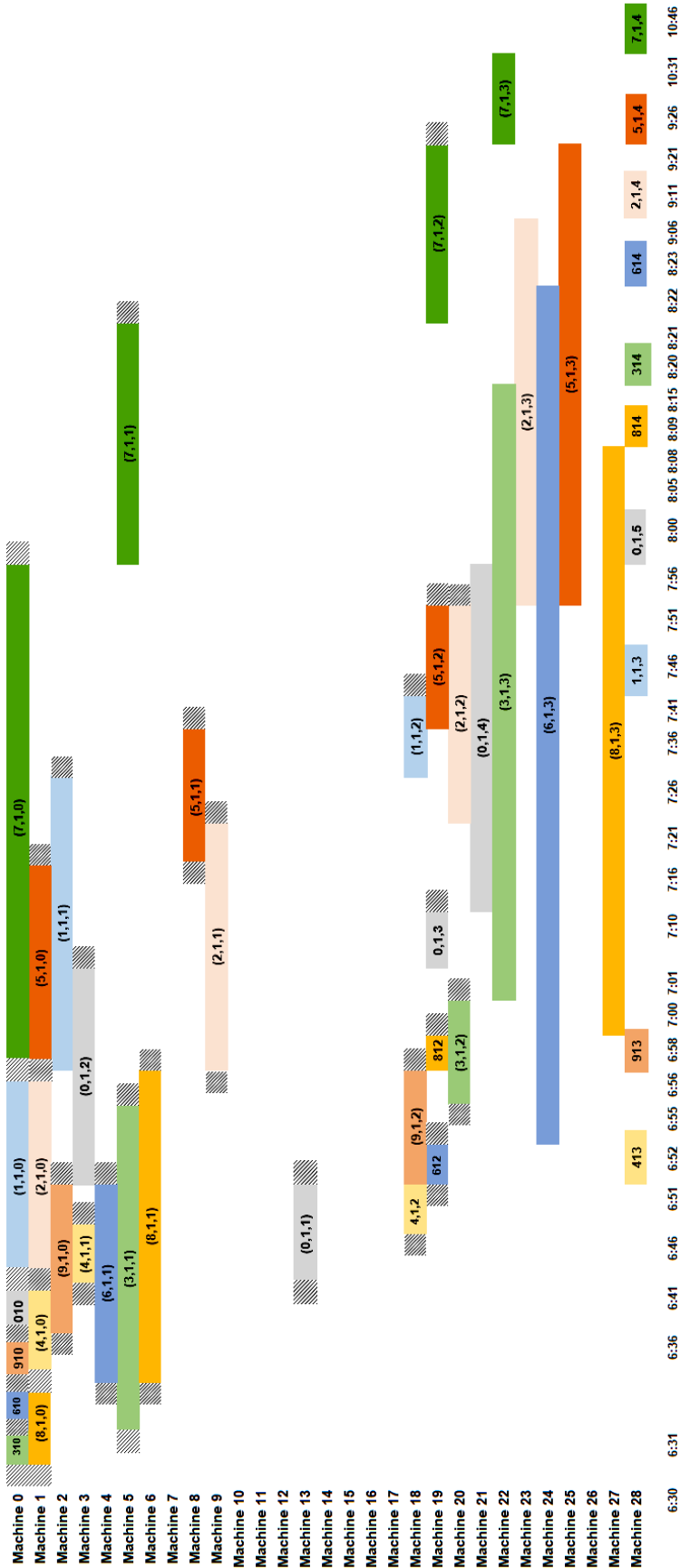


FIGURE 5.42 – Diagrammes de Gantt de la solution résultante de l'instance avec 10 tâches, 48 opérations et 29 machines.



## 5.7 Résultats numériques

Dans cette sous-section, les résultats des méthodes de résolution développées pour le FJSP-SDST-JS-MTMR, sur plusieurs instances de types et de tailles différents sont présentés et discutés dans la sous-section 5.8.

J	SL	O	M	F0 (h)	T0 (s)	F1 (h)	T1 (s)	F2 (h)	T2 (s)	F3 (h)	T3 (s)	F4 (h)	T4 (s)
2	2	10	29	15.3	2	15.3	0.1	15.3	0.3	15.3	0.01	15.3	0.08
3	3	15	29	24.4	4	24.4	0.2	24.4	0.5	24.4	0.04	24.4	0.14
4	4	20	29	32.8	120	32.8	0.3	32.8	0.8	32.8	0.06	32.8	0.18
5	5	24	29	39.9	240	39.9	0.4	39.9	1.0	39.9	0.1	39.9	0.28
6	6	29	29	49.2	1200	49.2	0.6	49.2	1.4	49.2	0.16	49.2	0.40
7	7	34	29	57.6	2700	57.6	0.8	57.6	1.8	57.6	0.26	57.6	0.54
8	10	39	29	69.4	9000	69.4	1.0	69.4	2.0	69.4	0.46	69.4	0.76
9	11	44	29	-	>10,800	77.7	1.5	77.7	3.0	77.7	0.71	77.7	1.2
10	12	48	29	-	>10,800	85.0	2.0	85.0	4.0	86.4	0.96	85.9	1.4
20	22	93	29	-	>10,800	162.4	30	162.4	60	166.5	5	165.8	11
30	32	138	29	-	>10,800	252.9	60	252.9	120	262.3	15	260.6	31
40	42	179	29	-	>10,800	339.7	90	339.7	180	354.9	23	352.3	49
50	58	227	29	-	>10,800	471.6	138	478.6	276	490.6	30	485.6	60
60	68	271	29	-	>10,800	590.4	180	593.9	360	624.4	43	616.7	87
70	78	315	29	-	>10,800	682.8	228	677.6	468	720.7	51	715.2	103
82	92	370	29	-	>10,800	798.3	300	788.6	600	846.5	70	840.8	141

J : nombre de tâches, SL : nombre de lots, O : nombre d'opérations, M : nombre de machines, F0 :  $\sum_i C_i$  du modèle mathématique, T0 : temps d'exécution du modèle mathématique, F1 :  $\sum_i C_i$  du GA 1, T1 : temps d'exécution GA 1, F2 :  $\sum_i C_i$  du GA 2, T2 : temps d'exécution GA 2, F3 :  $\sum_i C_i$  de ILS 1, T3 : temps d'exécution ILS 1, F4 :  $\sum_i C_i$  de ILS 2, T4 : temps d'exécution ILS 2.

TABLE 5.14 – Résultats des méthodes de résolution développées sur des instances réelles du CHT.

J	SL	O	M	F0 (h)	T0 (s)	F1 (h)	T1 (s)	F2 (h)	T2 (s)	F3 (h)	T3 (s)	F4 (h)	T4 (s)
110	110	402	29	-	>10,800	986.7	480	986.2	720	1030.5	115	1018.4	225
100	100	342	29	-	>10,800	696.5	270	696.5	480	732.3	65	723.5	126
90	90	324	29	-	>10,800	704.7	240	705.1	360	740.2	58	732.5	112
80	80	286	29	-	>10,800	525.6	205	525.5	356	556.7	48	548.7	94
60	60	200	29	-	>10,800	248.8	140	248.5	210	262.4	34	258.6	65
50	50	173	29	-	>10,800	318.9	110	318.3	198	336.9	28	331.5	54
20	20	74	29	-	>10,800	158.6	60	158.2	108	165.3	15	163.9	28
15	15	59	29	-	>10,800	421.5	52	421.1	92	432.1	12	428.8	22
10	10	31	29	-	>10,800	215.4	20	215.1	34	219.8	4	217.9	7
9	9	34	29	-	>10,800	368.8	15	368.1	25	376.5	3	374.1	5

TABLE 5.15 – Résultats des méthodes de résolution développées sur des instances générées aléatoirement de type CHT.

J	SL	O	M	F0 (h)	T0 (s)	F1 (h)	T1 (s)	F2 (h)	T2 (s)	F3 (h)	T3 (s)	F4 (h)	T4 (s)
3	12	11	6	117	16	117	3.0	117	6	123	0.1	122	0.4
3	8	13	6	85	24	85	5.0	85	10	89	0.2	88	0.8
3	10	8	6	45	10	45	1.5	45	3	47	0.06	47	0.1
3	11	11	6	55	20	55	4.0	55	8	58	0.2	57	1.0
3	12	12	6	117	104	117	24	117	48	120	1.6	119	3.8
3	11	13	6	78	30	78	6.0	78	12	81	0.4	80	1.2
3	10	12	6	88	172	88	42	88	82	92	3.6	91	8.8
3	10	13	6	103	240	103	56	103	112	106	7.6	105	13.6
3	10	10	6	76	28	76	6.0	76	12	80	0.5	79	1.7
3	8	9	6	44	24	44	5.0	44	10	45	0.3	45	1.4

TABLE 5.16 – Résultats des méthodes de résolution développées sur des instances générées aléatoirement de petites tailles.

J	SL	O	M	F0 (h)	T0 (s)	F1 (h)	T1 (s)	F2 (h)	T2 (s)	F3 (h)	T3 (s)	F4 (h)	T4 (s)
10	10	132	6	-	>10,800	285.8	20	285.2	30	298.2	5	294.1	8
15	15	168	7	-	>10,800	302.4	24	302.0	35	312.5	7	308.7	12
20	20	146	8	-	>10,800	320.5	30	320.1	45	332.8	9	328.5	16
25	25	154	9	-	>10,800	332.6	35	332.0	52	345.0	11	340.2	20
30	30	151	10	-	>10,800	338.2	42	337.8	60	350.8	13	346.6	24
35	35	149	11	-	>10,800	354.3	50	353.8	75	368.4	15	363.1	28
40	40	179	12	-	>10,800	365.1	58	364.6	86	378.9	18	375.2	34
45	45	221	13	-	>10,800	381.8	70	381.0	102	396.3	22	392.7	42
50	50	191	14	-	>10,800	395.0	85	398.5	124	410.1	28	406.4	54
55	55	205	15	-	>10,800	412.7	108	418.2	158	428.6	34	424.5	65
60	60	195	16	-	>10,800	434.2	120	439.0	178	448.0	40	446.3	76
65	65	201	17	-	>10,800	454.3	138	448.5	202	472.1	46	468.9	88
70	70	256	18	-	>10,800	468.5	160	460.8	235	486.8	52	482.7	95
75	75	258	19	-	>10,800	485.6	184	492.1	272	504.6	60	501.4	116
80	80	300	20	-	>10,800	498.0	215	510.3	318	516.5	68	512.1	128

TABLE 5.17 – Résultats des méthodes de résolution développées sur des instances générées aléatoirement de grandes tailles.

	J	SL	O	M	F0 (h)	T0 (s)	F1 (h)	T1 (s)	F2 (h)	T2 (s)	F3 (h)	T3 (s)	F4 (h)	T4 (s)
Azzouz et al. [214]	3	3	11	3	74	8	74	2.0	74	4.2	78	0.50	76	1.05
Bagheri et al. [168]	3	3	11	3	68	6	68	1.5	68	3.1	72	0.38	70	0.78
Pezzella et al. [204]	3	3	10	4	33	7	33	1.8	33	3.8	35	0.46	34	0.95
Nouri et al. [216]	3	3	9	5	31	10	31	2.8	31	5.6	33	0.82	32	1.42
Lee et al. [178]	3	3	22	5	102	92	102	0.2	102	0.6	104	0.04	103	0.13
Mousakhani [169]	4	4	12	3	101	9	101	2.5	101	5.2	106	0.64	104	1.35
Sriboonchandr et al. [215]	4	4	14	5	53	12	53	3.2	53	6.5	56	1.20	55	1.48

TABLE 5.18 – Résultats des méthodes de résolution développées sur des instances adaptées de la littérature.

## 5.8 Discussion des résultats numériques

Les critères d'optimisation des métaheuristiques développées sont basés sur la qualité des solutions et la rapidité de calcul. La qualité et l'efficacité des métaheuristiques ont été démontrées en comparant les solutions obtenues avec ces algorithmes et les solutions optimales du modèle mathématique. Concernant la rapidité, les temps de calcul des algorithmes ont été comparés à ceux du modèle mathématique. D'après les tableaux de résultats présentés dans la section 5.7, nous remarquons que les deux algorithmes génétiques sont efficaces en termes de qualité et de rapidité. La performance des méthodes de résolution développées dépend des types d'instances et de leurs tailles, et elle dépend également du choix des heuristiques pour la génération des solutions initiales. Les résultats des algorithmes génétiques sur différents types d'instances (Tables 5.14–5.18) montrent que les métaheuristiques développées sont efficaces en termes de qualité. Le tableau 5.14 représente les résultats des différentes méthodes de résolution développées sur une instance réelle du CHT ayant 82 tâches, 92 sous-lots, 370 opérations, et 29 machines. L'Annexe A.23 présente le planning de production obtenu pour cette instance. À partir de cette instance, plusieurs sous-instances ont été construites en augmentant à chaque fois le nombre de tâches, de lots et d'opérations pour voir à partir de quelle taille d'instance le modèle n'est pas capable de trouver des solutions optimales. D'après la Table 5.14, nous observons que pour les instances réelles du CHT, le modèle mathématique a rapidement trouvé des solutions pour les petites instances avec moins de 5 tâches, 5 lots, 24 opérations et 29 machines. Il prend un peu plus de temps pour les instances avec plus de 6 tâches, 6 lots, 29 opérations et 29 machines. Néanmoins, pour les instances avec plus de 9 tâches, 44 opérations et 29 machines, après plus de 3 heures d'exécution, le modèle mathématique n'a pas convergé vers la solution optimale. Pour ces instances, les deux algorithmes génétiques ont réussi à trouver des solutions réalisables en des temps de calcul très courts. Par exemple, pour la grande instance avec 82 tâches, 92 lots, 370 opérations et 29 machines, une solution faisable respectant toutes les contraintes a été trouvée après 5 min d'exécution avec le premier algorithme génétique.

Les Tables 5.15–5.17 présentent les résultats expérimentaux des méthodes de résolution en termes de qualité et de rapidité sur des instances générées aléatoirement, et une comparaison entre les solutions obtenues par ces différentes méthodes. D'après les résultats présentés dans ces tableaux, nous remarquons que les algorithmes génétiques ont trouvé des solutions réalisables pour les instances de grande taille dans des temps de résolution raisonnables.

Dans la Table 5.18, on observe que pour les instances adaptées de la littérature, les algorithmes génétiques permettent d'améliorer les solutions de ces instances. Par exemple, pour l'instance de Lee et al. [178], les algorithmes génétiques ont apporté une amélioration de 3.92% par rapport aux solutions obtenues avec les méthodes proposées par Lee et al. [178].

En comparant les résultats expérimentaux des méthodes de résolution sur l'ensemble des instances testées, nous observons que pour certaines instances, les deux AGs ont convergé vers les solutions optimales en un temps de calcul très court par rapport au modèle mathématique. Pour les instances

pour lesquelles l'optimalité n'a pas été atteinte, les écarts entre les solutions obtenues avec les algorithmes génétiques et les solutions optimales sont très faibles. Pour les grandes instances pour lesquelles le modèle mathématique n'a pas trouvé de solutions après plus de 3 heures d'exécution, les algorithmes génétiques ont trouvé des solutions réalisables dans des temps de calcul raisonnables.

Comparant les deux algorithmes génétiques en termes de rapidité, le premier algorithme est plus rapide que le second, tandis qu'en les comparant en termes de stabilité, les deux algorithmes sont stables pour les instances réelles du CHT et les instances générées aléatoirement, alors que pour les instances générées aléatoirement de type CHT, le second algorithme est plus stable que le premier algorithme. En comparant les deux algorithmes en termes de qualité des solutions, la performance des algorithmes dépend des types d'instances. Pour certaines instances, le premier algorithme est meilleur que le second, alors que pour d'autres instances, le second algorithme est plus efficace que le premier.

En comparant les résultats obtenus avec les algorithmes génétiques et les méthodes de recherche locale itérative sur l'ensemble des instances testées, nous constatons que les ILSs sont moins bons que les AGs en termes de qualité des solutions obtenues. Cependant, en termes de rapidité, les méthodes ILSs sont plus rapides que les AGs.

## 5.9 Conclusion

Dans ce chapitre, nous nous sommes focalisés sur la présentation des résultats expérimentaux des métaheuristiques développées dans cette étude pour le problème FJSP-SDST-JS-MTMR. Nous avons présenté la démarche de génération des données et de construction des instances. Ensuite, les résultats d'évaluation de performance des heuristiques de génération des solutions initiales et des opérateurs développés, ainsi que la méthodologie de paramétrage des métaheuristiques ont été présentés. Par la suite, les résultats d'implémentation et de comparaison entre les approches de résolution et le modèle mathématique développés, sur plusieurs instances théoriques et réelles de différentes tailles ont été présentés et discutés. Les résultats expérimentaux des méthodes de résolution sur l'ensemble des instances testées ont démontré leur performance en termes de qualité et rapidité. Ces résultats ont montré que les algorithmes génétiques ont convergé vers les solutions optimales, pour la plupart des instances de petites tailles, en un temps de calcul très court par rapport au modèle mathématique. Pour les instances pour lesquelles l'optimalité n'a pas été atteinte, les écarts entre les solutions obtenues avec les algorithmes génétiques et les solutions optimales sont très faibles. De plus, pour les grandes instances pour lesquelles le modèle mathématique n'a pas trouvé de solutions après plus de 3 heures d'exécution, les algorithmes génétiques ont trouvé des solutions réalisables dans des temps de calcul raisonnables à l'ordre de 5 min. Les résultats de comparaison des métaheuristiques montrent que les méthodes de recherche locale itérative sont moins bonnes que les algorithmes génétiques en termes de qualité des solutions obtenues. Cependant, en termes de rapidité, les méthodes ILSs sont plus rapides que les AGs. Les méthodes de résolution

développées pour le problème FJSP-SDST-JS-MTMR présentées dans le chapitre 4, ainsi que les résultats d'implémentation de ces métaheuristiques présentés dans ce chapitre, ont fait l'objet de publications dans des conférences internationales Abderrabi et al. [219], Abderrabi et al. [237], Abderrabi et al. [238] et un article dans une revue internationale a été publié Abderrabi et al. [239].





## Chapitre 6

# Application industrielle

### 6.1 Introduction

Dans les chapitres précédents, nous avons présenté le problème d’ordonnancement des processus de production alimentaire en restauration hospitalière, en mettant l’accent sur les différentes contraintes de ce problème, ainsi que le critère d’optimisation visé dans le cadre de cette étude. Par la suite, nous avons présenté et décrit le fonctionnement des différentes méthodes de résolution développées pour résoudre le problème étudié. Ces dernières ont été testées sur plusieurs instances théoriques et réelles. Les résultats obtenus sur ces différents types d’instances ont montré l’efficacité et la performance des algorithmes développés pour la résolution du problème considéré, ce qui nous a amené à passer à l’application des méthodes proposées sur le système de production réel. Dans le présent chapitre, nous nous focalisons dans un premier temps sur la présentation de la démarche de collecte des données sur le terrain, ainsi que les différentes étapes de traitement de ces données. Ensuite, nous présentons les résultats d’application des méthodes développées sur des journées réelles de production avec une comparaison entre les ordonnancements réels et proposés. Par la suite, les résultats d’une étude sur l’impact d’intégration des temps de pause sont présentés et discutés. La dernière partie de ce chapitre présente des métriques de similarité qui ont été mises en place afin d’assurer la stabilité au niveau de l’organisation quotidienne du travail et favoriser le bien-être des employés.

### 6.2 Démarche de recueil de données

Comme il a été décrit dans le chapitre 1, le service de restauration dispose de plusieurs logiciels permettant de gérer la production des repas. Néanmoins, il n’existe aucun logiciel pour la gestion des différentes données concernant la préparation des plats (temps opératoires des opérations, temps de montage et démontage des machines, temps de setup des machines, dates de fin de traitement au plus tard des tâches, etc). Pour l’analyse du système, puis la validation du modèle mathématique et des approches de résolutions développés, nous avons entrepris la collecte des données sur le terrain. Cette phase nous a permis de rencontrer l’ensemble des acteurs de la chaîne concernée par les

flux alimentaires. Nous avons travaillé en collaboration avec le responsable de restauration et les responsables des différents secteurs de production. De nombreuses réunions ont été réalisées afin de recueillir l'ensemble des données et des informations nécessaires. Outre les réunions, nous avons suivi en temps réel l'activité quotidienne des agents cuisiniers, afin de comprendre et mieux appréhender les étapes du processus de production des repas et pour la collecte des données nécessaires en temps réel. Nous avons ainsi construit des instances réelles sur lesquelles nous avons testé et validé la fonctionnalité des différentes méthodes de résolution développées.

Les données sur les temps opératoires des opérations ont été chronométrées en temps réel, en suivant les différents postes de travail (production chaude et froide, conditionnement chaud et froid, tranchage et refroidissement) du début jusqu'à la fin du process sur plusieurs journées de production. Le chronométrage des temps opératoires et la construction des instances sont effectués six semaines avant les essais. En effet, le menu d'une semaine donnée sera déroulé dans les six semaines à venir avec les mêmes demandes de repas, en apportant quelques modifications et des demandes supplémentaires. L'Annexe [A.17](#) présente les résultats bruts de recueil de données sur terrain pour la construction des instances réelles. Les informations sur l'ordre de réalisation des tâches, ainsi que leur heure de début et de fin de traitement (voir Annexe [A.18](#)) sont également collectées afin de comparer les temps de présence des tâches dans le système de production dans les plannings de l'organisation réelle et ceux proposés par les algorithmes développés. De plus, les informations sur les taux d'occupation des machines sont aussi recueillis (voir Annexe [A.19](#)) afin d'évaluer et de comparer la charge de travail des ressources dans les solutions réelles et celles obtenues par les algorithmes.

Les Tables [6.1](#), [6.2](#) et [6.3](#) présentent un planning partiel d'une journée de production avec les données recueillies et les durées opératoires des opérations chronométrées en temps réel. Dans les tableaux ci-dessous, chaque ligne représente l'intitulé du plat, la quantité demandée, la gamme opératoire du plat, ainsi que les heures réelles de début, de fin de traitement et le nombre d'agents nécessaires, pour chaque opération de la gamme opératoire du plat. Les données fixes (temps de montage et de démontage des machines, setup des machines, temps de nettoyage des plans de travail, etc) pour l'ensemble des instances ont été chronométrées sur plusieurs journées pour s'assurer de leur fiabilité.

Plat	Quantité	Production chaude						Refroidissement					
		Matériau	Début	Fin	Nombre d'agents	Début	Fin	Machine	Nombre d'agents	Début	Fin	Machine	
1 Jus de viande	300	Sauteuse 1	7h40	7h40	1	7h40	8h05	3	7h40	8h05	3		
2 Sauce crème	1387	Sauteuse 2	7h40	7h40	1	7h40	8h05	1	7h40	8h05	1		
3 Choux fleurs mixés sans sel	8	Four 1 (GN1/2)	7h45	7h45	1	7h45	7h45	1	7h45	7h45	1		
4 Sauce gigot	136	Rondeau	7h40	7h40	1	7h40	7h45	3	7h40	7h45	4		
5 Cocotte d'agneau sauce ail	77	Four 2 (GN1/2)	7h40	7h40	1	7h40	7h45	2	7h40	7h45	5		
6 Sauce ail	77	Rondeau	7h40	7h40	1	7h40	7h45	2	7h40	7h45	6		
7 Fumet	2	Rondeau	7h40	7h40	1	7h40	7h45	2	7h40	7h45	6		
8 Epinards	1088	Four 1, 2 (GN2/3)	7h40	7h40	1	7h40	7h45	3	7h40	7h45	3		
9 Epinards béchamel	96	Four 1, 2 (GN2/3)	7h40	7h40	1	7h40	7h45	3	7h40	7h45	3		
10 Epinards nature	14	Four 1 (GN1/2)	7h40	7h40	1	7h40	7h45	2	7h40	7h45	3		
11 Purée d'épinards	279	Four 1 (GN2/3)	7h40	7h40	1	7h40	7h45	3	7h40	7h45	1		
12 Crème vanille sans sucre	202	Marmite 150L	8h00	8h00	1	8h00	8h05	3	8h00	8h05	3		
13 Escalope de vealotte	145	Sauteuse 1, 2	8h15	8h15	1	8h15	8h40	3	8h15	8h40	3		
14 Escalope de vealotte nature	12	Four 3 (GN1/2)	8h15	8h15	1	8h15	8h40	3	8h15	8h40	3		
15 Velouté de boîtes*	570	Marmite 400L	8h15	8h15	1	8h15	8h40	2	8h15	8h40	2		
16 Velouté de boîtes enrichi*	275	Marmite 300L	8h15	8h15	1	8h15	8h40	2	8h15	8h40	2		
17 Saï	127	Four 1 (GN1/2)	8h15	8h15	1	8h15	8h40	2	8h15	8h40	2		
18 Saï nature	6	Four 1 (GN1/2)	8h15	8h15	1	8h15	8h40	2	8h15	8h40	2		
19 Carottes vichy	4	Four 2 (GN2/3)	8h15	8h15	1	8h15	8h40	2	8h15	8h40	4		
20 Carottes vichy nature	5	Four 2 (GN2/3)	8h15	8h15	1	8h15	8h40	2	8h15	8h40	4		
21 Haricots verts nature	21	Four 2 (GN1/2)	8h15	8h15	1	8h15	8h40	2	8h15	8h40	4		
22 Haricots verts sautés sans sel	35	Four 2 (GN1/2)	8h15	8h15	1	8h15	8h40	2	8h15	8h40	4		
23 Po	302	Four 2 (GN2/3)	8h15	8h15	1	8h15	8h40	2	8h15	8h40	4		
24 Po nature	29	Four 2 (GN2/3)	8h15	8h15	1	8h15	8h40	2	8h15	8h40	4		
25 Poisson poché	112	Four 2 (GN2/3)	8h15	8h15	1	8h15	8h40	2	8h15	8h40	4		
26 Poisson poché nature	15	Four 2 (GN2/3)	8h15	8h15	1	8h15	8h40	2	8h15	8h40	4		
27 Poisson poché vinaigrette	13	Four 2 (GN2/3)	8h15	8h15	1	8h15	8h40	2	8h15	8h40	4		
28 Cœur de céleri	141	Four 3 (GN1/2)	8h15	8h15	1	8h15	8h40	2	8h15	8h40	4		
29 Cœur de céleri nature	4	Four 3 (GN1/2)	8h15	8h15	1	8h15	8h40	2	8h15	8h40	4		
30 Tarte au fromage	30	Four 5 (GN1/2)	8h15	8h15	1	8h15	8h40	2	8h15	8h40	4		
31 Coquillettes	396	Marmite 1 (600L)	8h15	8h15	1	8h15	8h40	2	8h15	8h40	4		
32 Coquillettes nature	11	Marmite 1 (600L)	8h15	8h15	1	8h15	8h40	2	8h15	8h40	4		
33 Coquillettes tomate	4	Marmite 1 (600L)	8h15	8h15	1	8h15	8h40	2	8h15	8h40	4		
34 Cœur de carotte aux olives	108	Four 2 (GN1/2)	8h15	8h15	1	8h15	8h40	2	8h15	8h40	4		
35 Poisson sauce crème	1040	Four 1, 2 (GN2/3)	8h15	8h15	1	8h15	8h40	2	8h15	8h40	4		
36 Poisson sauce crème	600	Marmite 400L	8h15	8h15	1	8h15	8h40	2	8h15	8h40	4		
37 Potage enrichi	275	Marmite 300L	8h15	8h15	1	8h15	8h40	2	8h15	8h40	4		

TABLE 6.1 – Postes de production chaude et conditionnement chaud.

N° Cellule	Produit	Fin cuisson		Entrée cellule		Sortie cellule		Durée du refroidissement	C
		Heure	T°C	Heure	T°C	Heure	T°C		
3	Pomme avec sauce au beurre	12h30	73°	12h50	64°	12h10	3°	1h20	x
1	Flan Courgette	12h30	86°	12h50	66°	12h00	9°	1h10	x
2	Flan de courgettes	12h50	81°	12h10	60°	12h20	9°	1h20	x
6	Pomme frites	12h00	63°	12h10	65°	12h30	8°	1h20	x
5	Sauces	12h10	73°	12h30	61°	12h20	8°	1h00	x
1	Viande de porc au jus	12h50	78°	12h10	73°	12h00	7°	1h00	x
3	Viande de porc au jus	12h00	76°	12h20	70°	12h10	8°	50min	x
2	Viande de porc au jus	12h10	73°	12h40	65°	12h40	8°	1h00	x
6	Pâtisseries	12h10	73°	12h30	70°	12h10	7°	1h00	x

TABLE 6.2 – Poste de refroidissement.

Plat	Quantité	Gamme n°	Production		Nb d'agent	Conditionnement		Matériau	Nb d'agent
			Début	Fin		Début	Fin		
1 JAMBON BLANC NATURE	1	1	7h35	7h40	1	8h00	8h03	0,2	1
2 JAMBON BLANC	14	1	7h35	7h40	1	8h00	8h07	0,2	1
3 MAGLIERAUX VIN BLANC *	6	1	7h40	7h45	1	8h00	8h00	0,2	1
4 POMME CUITE S/SUCRE *	9	1	7h35	7h40	1	7h40	7h40	0,2	1
5 PRUNEAUX	10	1	7h40	7h42	1	7h45	7h46	0,2	1
6 SAUCE TOMATE	7	1	7h40	7h40	1	7h40	7h40	0,2	1
7 TERRINE POISSON	24	1	7h25	7h40	1	7h48	7h49	0,2	1
8 POMMES VAPÉUR *	26	1	7h35	7h38	1	8h05	8h05	0,2	1
9 CRÈME FRAICHE	104	1	7h25	7h30	1	7h30	7h45	0,2	2
10 DEMI PAMPLEMOUSSE	54	1	7h20	7h30	1	8h05	8h15	0,2	2
11 DEMI PAMPLEMOUSSE S/SUCRE	34	1	7h20	7h30	1	8h05	8h15	0,2	2
12 ŒUFS NATURELS	10	1	7h45	8h05	1	8h15	8h25	0,2	2
13 ŒUFS VINAIGRETTE	45	1	7h45	8h05	1	8h15	8h25	0,2	2
14 ŒUFS DURS X2	105	1	7h45	8h05	1	8h15	8h25	0,2	2
15 ŒUFS DURS X2 VINAIGRETTE	3	1	7h45	8h05	1	8h15	8h25	0,2	2
16 BARRIQUETTE DE SAUCE	42	5	7h25	7h30	1	7h35	7h40	0,2	3
17 SALADE VERTE	13	1	7h30	7h40	1	8h00	8h05	0,2	3
18 SALADE VERTE VGT	165	1	8h20	8h40	1	8h50	8h55	0,2	3
19 CHOUX FLEUR VGT MIX	10	2	10h10	10h30	1	11h20	11h20	0,2	3
20 CHOUX FLEURS VINAIGRETTE	35	2	7h10	7h20	1	7h20	7h25	0,2	2
21 FLAN PÂTISSIER *	950	10	7h45	8h10	2	8h30	8h48	0,2	3
22 PURÉE DE POT NATURE	30	1	7h50	8h35	1	8h05	8h35	0,2	3
23 PURÉE DE POT	442	1	7h40	8h35	1	8h05	8h35	0,2	3
24 PURÉE AU GRUYÈRE	263	1	8h05	8h00	1	8h40	8h50	0,2	2
25 PURÉE D'EPINARDS	148	1	10h40	11h20	1	11h45	11h50	0,2	3
26 PURÉE D'EPINARDS BECHAMEL	73	1	10h10	11h20	1	11h05	11h55	0,2	3
27 SALADE COLESLAW MIXE *	365	1	10h10	10h20	1	11h05	11h20	0,2	3
28 SALADE COLESLAW *	70	1	8h20	8h45	1	10h30	11h05	0,2	3
29 SAUCE MODENAY	24	1	7h20	7h38	1	7h20	7h38	0,2	2
30 ŒUFS SCE MORNAV	33	1	7h20	7h35	1	12h00	12h03	0,2	2
31 EPINARDS BECHAMEL	6	2	10h35	11h00	2	11h00	11h05	0,2	1
32 EPINARDS FLORENTINE	879	2	10h35	12h25	2	12h25	13h40	0,2	4
33 CRÈME VANILLE S/SUCRE	247	4	8h05	8h55	1	8h05	8h55	0,2	1
34 PIZZA ROYALE	58	2	7h35	12h00	1	12h10	12h20	0,2	1
35 CLAUQUITS AUX POIRES	40	2	8h05	7h35	1	13h25	13h35	0,2	1
36 PÂTE DE FOIE MOUSSE	18	1	7h25	7h35	1	7h50	7h55	0,2	1
37 PÂTE DE FOIE	11	1	7h25	7h35	1	7h50	7h55	0,2	1
38 HOSBEET NATURE	7	1	7h35	7h45	1	8h15	8h15	0,2	2
39 HOSBEET	13	1	7h35	7h45	1	8h15	8h15	0,2	2
40 ROTI DE VEAU NATURE	4	1	8h10	8h35	1	9h35	9h38	0,2	1
41 ROTI DE VEAU *	71	1	8h10	8h35	1	9h35	9h38	0,2	1
42 HACHE DINDE *	11	1	7h45	10h05	1	10h05	10h10	0,2	1
43 HACHE LAPIN	155	1	8h35	10h10	1	10h10	10h25	0,2	2
44 HACHE DINDE MARI NIS	246	1	7h45	10h20	1	10h25	10h35	0,2	3
45 HACHE DE COULEUR	20	1	10h30	10h45	1	10h45	10h45	0,2	1

TABLE 6.3 – Postes de production froide et conditionnement froid.

Le refroidissement représente le goulot d'étranglement et l'opération nécessitant un temps de traitement plus long dans le processus de production des repas, tel que le montre la Figure 6.1. Cette Figure présente un planning d'une organisation réelle d'une journée de production, avec la liste des plats préparés, l'affectation aux ressources, ainsi que les temps de traitement des opérations du pré-traitement, cuisson, conditionnement et refroidissement.

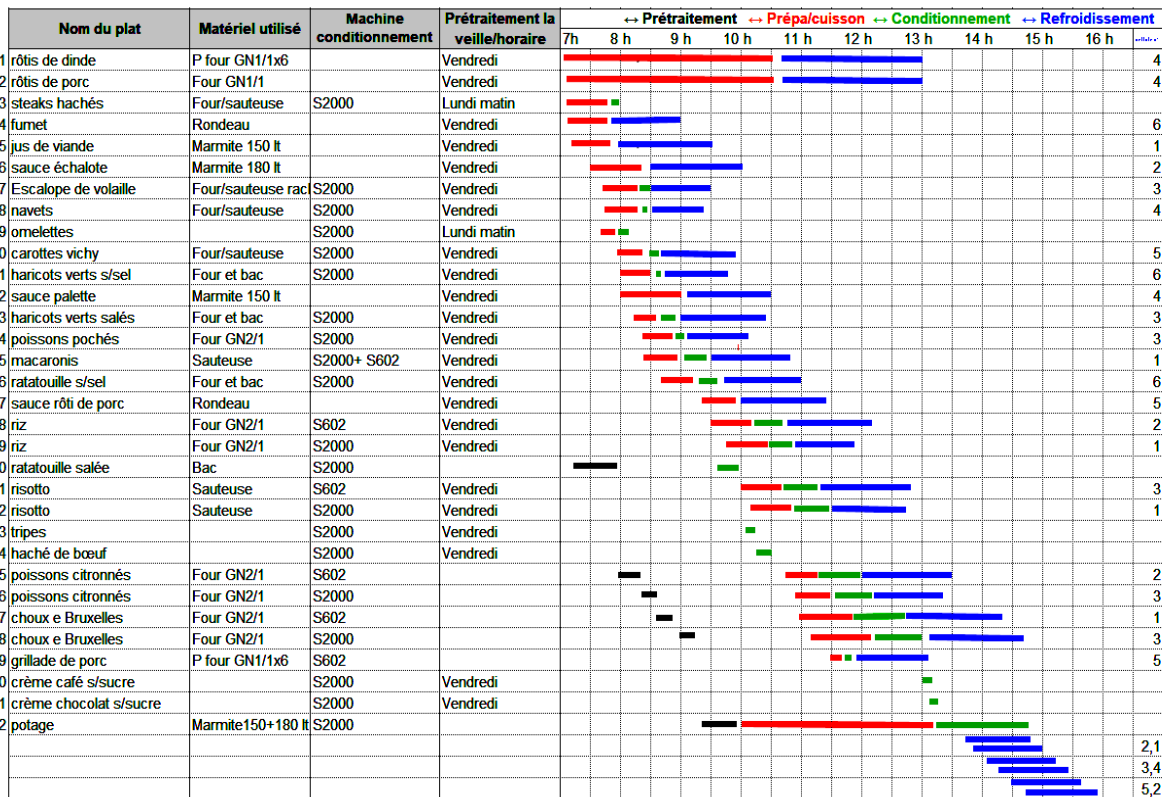


FIGURE 6.1 – Planning partiel d'une organisation réelle d'une journée de production.

Le refroidissement est considéré comme une étape ralentissante du processus de fabrication des repas, en raison du manque de cellules de refroidissement disponibles. Afin d'optimiser l'utilisation de ces cellules, on admet que plusieurs plats peuvent être refroidis en même temps en utilisant la même cellule, tout en respectant les compatibilités de refroidissement entre les plats (voir Table 6.4). Deux plats sont compatibles entre eux, s'ils appartiennent à la même catégorie de densité (faible ou forte). De ce fait, pour chaque instance, une matrice de compatibilité entre les plats doit être définie. Cette matrice présente l'ensemble des plats ayant les mêmes densités de refroidissement et l'ensemble des cellules disponibles. Cette procédure de regroupement des plats dans les cellules de refroidissement doit respecter :

- les capacités des cellules de refroidissement,
- les contraintes de compatibilité entre les plats,
- les durées de temps requises entre la fin de conditionnement et le début de refroidissement des plats refroidis en même temps.



Plat	Refroidissement		
	Faible densité	Grande densité	Compatibilité
EPINARDS NATURE	X		OUI
EPINARDS		X	NON
COQUILLETES NATURE	X		OUI
COQUILLETES AU GRUYERE	X		OUI
COQUILLETES SCE TOMATE		X	NON
COQUILLETES	X		NON
POISSON POCHE NATURE	X		OUI
POISSON POCHE	X		OUI
HARICOTS VERTS NAT + S/SEL	X		OUI
HARICOTS VERTS SALE	X		OUI
CAROTTES VICHY	X		OUI
CAROTTES VICHY NATURE	X		OUI
ESCALOPE VOLAILLE NATURE	X		OUI
ESCALOPE VOLAILLE	X		OUI
VH AUX AROMATES	X		OUI
RIZ NATURE	X		OUI
RIZ	X		OUI
RIZ MADRAS		X	NON
POEELE MARAICHERE	X		NON
POIREAUX BRAISES		X	NON
POIREAUX NATURE		X	NON
POTAGE		X	NON
POTAGE ENRICHI		X	NON
SAUTE DE DINDE NATURE	X		OUI
SAUTE DE DINDE		X	NON
SAUTE DE DINDE MARENGO		X	NON
CHOUX FLEUR MIX	X		NON
PUREE AU GRUYERE		X	NON
PUREE D'EPINARDS		X	NON
PUREE D'EPINARDS BECHAMEL		X	NON
PUREE DE PDT		X	NON

Faible densité = refroidissement rapide, Grande densité = refroidissement plus long, Compatibilité = faible quantité à refroidir

TABLE 6.4 – Compatibilité entre les plats d'une instance réelle de production.

En plus des demandes journalières des plats, d'autres demandes imprévues sont arrivées les jours de production pour les repas de déjeuner et de dîner. En raison du manque des données sur les historiques de ces demandes imprévues, un process de récupération de ces historiques est mis en place sur plusieurs semaines. Les résultats de récupération de ces données sont présentés dans les Tables 6.5 et 6.6. Dans ces Tables, chaque ligne représente l'intitulé du plat demandé, sa quantité et sa gamme opératoire, ainsi que les heures réelles de début, de fin de traitement et le nombre d'agents requis, pour chaque opération de la gamme opératoire du plat, pour pouvoir estimer les temps de production nécessaires pour ces demandes imprévues. Afin d'intégrer ces nouvelles demandes, pour chaque planning journalier de production, des plages horaires sont prévues et des tâches fictives sont intégrées. Sachant que les informations sur les demandes imprévues, pour l'ensemble des clients servis, ne sont connues qu'à partir de 07h15 pour les repas de déjeuner et à partir de 11h00 pour les repas de dîner, des contraintes de dates de début au plus tôt pour ces nouvelles tâches fictives doivent être respectées.

	Plat	Quantité	Gamme n°	Production froide			Conditionnement			Durée	
				Début	Fin	Nb d'agent	Début	Fin	Machine		Nb d'agent
<b>21/12/2020</b>											
1	Salade coleslaw	30	1	07:20	07:30	1	07:45	07:50	O2	2	00:15
2	Salade coleslaw Mx	40	1	07:30	07:45	1	07:50	07:58	O2	2	00:23
3	Epinards à la florentine	30	2	13:30	13:50	1	14:00	14:10	O2	2	00:30
<b>22/12/2020</b>											
1	Céleri Mx	26	1	07:30	07:40	1	07:40	07:50	O2	2	00:20
<b>23/12/2020</b>											
1	Macaronis	4	1	07:20	07:25	1	07:25	07:30	S602	1	00:10
2	Huile colza	4	1	07:20	07:25	1	07:25	07:30	S602	1	00:10
3	Hachis parmentier	8	1	13:00	13:10	1	13:10	13:15	S602	1	00:10
<b>24/12/2020</b>											
1	Taboulé	40	1	07:20	07:30	1	07:30	07:40	O2	2	00:20
<b>26/12/2020</b>											
1	Crêpes Mx	8	1	07:15	07:25	1	07:30	07:35	S602	1	00:15
<b>28/12/2020</b>											
Pas de demandes imprévues											
<b>29/12/2020</b>											
1	Crêpes Mx	60	1	07:15	07:40	1	07:40	07:50	O2	2	00:30
2	Omelette	40	1	-	-	-	12:00	12:10	O2	2	00:10
<b>30/12/2020</b>											
1	Jambonneau	20	1	07:20	07:30	1	07:35	07:40	O2	2	00:15
2	Betteraves	40	1	07:20	07:30	1	07:45	07:55	O2	2	00:20
3	Frites	9	1	07:20	07:30	1	07:30	07:35	S602	1	00:15
4	Moussaka	40	1	12:00	12:20	1	12:30	12:40	O2	2	00:30
<b>31/12/2020</b>											
1	Gougère	20	2	-	-	-	08:20	08:30	O2	2	00:10
<b>02/01/2021</b>											
Pas de demandes imprévues											
<b>04/01/2021</b>											
1	Haché poisson	16	1	07:20	07:30	1	07:30	07:40	O2	2	00:20
<b>05/01/2021</b>											
1	Crêpes Mx	16	1	07:20	07:30	1	07:30	07:35	O2	1	00:15
2	Haché de dinde nature	1	1	07:20	07:22	1	07:30	07:32	S602	1	00:04
<b>06/01/2021</b>											
1	Haché bœuf	16	1	07:15	07:25	1	07:30	07:40	O2	1	00:20
2	Frites	11	1	07:20	07:30	1	07:30	07:40	S602	1	00:20
<b>07/01/2021</b>											
1	Haricots blancs	20	1	07:20	07:30	1	07:30	07:35	O2	2	00:15
2	Rôti de porc	30	1	07:20	07:30	1	08:00	08:10	O2	2	00:20
3	Maquereaux moutarde	50	1	07:30	07:45	2	07:45	07:55	O2	2	00:25
4	Crêpes Mx	12	1	07:20	07:30	1	07:30	07:35	S602	1	00:15
<b>08/01/2021</b>											
1	Maquereaux au vin blanc	3	1	07:20	07:25	1	07:30	07:35	S602	1	00:10
2	Frites	10	1	07:20	07:30	1	07:30	07:40	S602	1	00:20
3	Assiette charcuterie	20	1	13:00	13:15	1	13:20	13:30	O2	1	00:25
<b>11/01/2021</b>											
1	Saucissons cuits	20	1	07:20	07:30	1	07:30	07:40	O2	1	00:20
<b>12/01/2021</b>											
1	Crêpes Mx	20	1	07:20	07:30	1	07:30	07:40	O2	2	00:20
<b>13/01/2021</b>											
1	Macaronis 100g	12	1	07:20	07:30	1	07:30	07:40	S602	1	00:20
2	Frites	6	1	07:20	07:30	1	07:30	07:32	O2	1	00:12
3	Pané fromager	6	1	07:20	07:30	1	07:32	07:35	O2	1	00:13

TABLE 6.5 – Historiques des demandes imprévues : poste de production froide.

	Plat	Quantité	Gamme n°	Production chaude				Conditionnement				Refrédissement		Durée	
				Début	Fin	Matériel	Nb d'agent	Début	Fin	Machine	Nb d'agent	Début	Fin		
<b>21/12/2020</b>															
1	Coquillettes	25	4	-	-	-	-	07:20	07:30	O2	2	-	-	-	00:10
2	Poireaux	15	4	-	-	-	-	07:30	07:40	O2	2	-	-	-	00:10
3	Epinards à la florentine	30	2	11:00	11:40	Four	1	-	-	-	-	12:00	13:00	-	00:40
<b>22/12/2020</b>															
Pas de demandes imprévues															
<b>23/12/2020</b>															
1	Hachis parmentier	8	2	12:00	12:30	Four	1	-	-	-	-	-	-	-	00:30
<b>24/12/2020</b>															
1	Boulin blanc	30	4	12:00	12:20	Four	1	12:30	12:35	O2	2	12:40	13:10	-	00:25
2	Gratin forestier	60	4	13:00	13:30	-	1	13:30	13:45	O2	2	-	-	-	00:45
<b>26/12/2020</b>															
Pas de demandes imprévues															
<b>28/12/2020</b>															
1	Quenelles	60	4	12:00	12:30	Four	1	-	-	-	-	12:40	13:10	-	00:30
2	Potée rustique	40	4	12:00	12:20	Four	1	12:30	12:45	S602	2	12:50	13:30	-	00:35
3	Quenelles sauce aurore	60	4	13:50	14:00	-	1	14:00	14:15	O2	2	-	-	-	00:25
<b>29/12/2020</b>															
1	Paspillette sauce forestière	40	4	-	-	-	-	07:20	07:30	O2	2	-	-	-	00:10
2	Chou fleurs	40	4	-	-	-	-	07:30	07:40	O2	2	-	-	-	00:10
<b>30/12/2020</b>															
Pas de demandes imprévues															
<b>31/12/2020</b>															
1	Gougère	20	2	07:15	07:45	Four	1	-	-	-	-	07:50	08:15	-	00:30
<b>02/01/2021</b>															
Pas de demandes imprévues															
<b>03/01/2021</b>															
1	100g Riz	8	4	07:15	07:20	-	1	07:20	07:25	S602	1	-	-	-	00:10
<b>04/01/2021</b>															
1	100g Coquillettes	12	4	07:20	07:30	-	1	07:30	07:40	S602	1	-	-	-	00:20
<b>05/01/2021</b>															
Pas de demandes imprévues															
<b>06/01/2021</b>															
1	Brandade	35	4	11:30	12:00	Four	1	12:00	12:15	O2	2	-	-	-	00:45
<b>07/01/2021</b>															
1	Gratin légume	20	4	12:00	12:50	Four	1	13:00	13:10	O2	1	13:15	13:55	-	01:00
<b>08/01/2021</b>															
Pas de demandes imprévues															
<b>11/01/2021</b>															
Pas de demandes imprévues															
<b>12/01/2021</b>															
1	Cordiale de légumes	30	4	12:00	12:30	Four	1	12:40	12:50	O2	2	13:00	13:30	-	00:40
2	Pave de saumon	6	4	12:00	12:15	Four	1	12:20	12:30	O2	1	12:35	12:55	-	00:25
<b>13/01/2021</b>															
1	Hachis parmentier	48	2	11:30	12:00	Four	1	12:00	12:15	O2	2	-	-	-	00:45

TABLE 6.6 – Historiques des demandes imprévues : poste de production chaude.

Il est important de noter que les résultats des tests et de mise en place des méthodes d’ordonnancement présentées dans les chapitres précédents dépendent de plusieurs facteurs, plus particulièrement la qualité des données recueillies notamment les temps de traitement des opérations, ainsi que la prise en compte des demandes imprévues et des aléas (indisponibilité des matières premières, panne des machines, absence du personnel, etc).

### 6.3 Traitement des données et exportation des résultats

Une fois que les données ont été collectées sur le terrain, elles ont par la suite été reportées dans un fichier Excel pour les stocker (voir Table 6.7). Pour pouvoir tester les algorithmes d’ordonnancement développés, les données traitées sont remplies dans un fichier d’entrée TXT (voir Annexe A.20). Vu la quantité importante de ces données, les fichiers d’entrées sont remplis d’une manière plus robuste afin de simplifier et faciliter leurs lectures. Les résultats d’exécution des algorithmes sont exportés dans un fichier de sortie TXT (voir Annexe A.21), et les résultats finaux des plannings de production sont présentés dans des tableaux Excel selon les préférences des agents, tel que le montre la Table 6.10. Dans cette Table, les lignes indiquent les informations relatives à chaque plat : son intitulé, la quantité demandée, le numéro de sa gamme opératoire, le modèle de barquette utilisé pour le conditionnement. Elles indiquent également, pour chaque opération, les heures de début et de fin de traitement, la machine sélectionnée pour la réaliser, ainsi que le nombre d’agents nécessaires. Afin d’évaluer les écarts entre les temps mesurés et réels, le déroulement des essais est suivi du début jusqu’à la fin de production. La Table 6.11 présente les résultats du déroulement d’une journée test de production, avec les temps opératoires réels, pour les postes de production froide et chaude.

Plat	Quantité	Gamme n°	Préchauffage		Production froide		Production chaude			Conditionnement		Refrigération	
			Durée	Nb d'agents	Durée	Nb d'agents	Durée	Matériel	Nb d'agents	Durée	Nb d'agents	Tournée	Durée
1 Assiette viande froide (agneau)	161	1	15 mn	1	45 mn	1	-	-	-	15 mn	1	-	-
2 Barquette de sauce	48	1	5 mn	1	5 mn	1	-	-	-	10 mn	2	-	-
3 Bavarois chocolat	541	1	25 mn	1	45 mn	1	-	-	-	20 mn	2	-	-
4 Betteraves vinaigrette	190	1	25 mn	1	15 mn	1	-	-	-	15 mn	2	-	-
5 Betteraves nature	5	1	2 mn	1	2 mn	1	-	-	-	1 mn	1	-	-
6 Betteraves mixées	8	1	3 mn	1	5 mn	1	-	-	-	2 mn	1	-	-
7 Bouchée d mragneau	2	1	2 mn	1	1 mn	1	-	-	-	1 mn	1	-	-
8 Bouchée d mragneau sauce crème	319	1	9 mn	1	45 mn	1	-	-	-	20 mn	2	-	-
9 Bouchée de bœuf	286	1	10 mn	1	45 mn	1	-	-	-	20 mn	2	-	-
10 Carottes persillées	116	4	12 mn	1	-	-	30 mn	four GN2/1	1	10 mn	1	1	1h00
11 Carottes vichy	90	4	12 mn	1	-	-	30 mn	four GN2/1	1	10 mn	2	-	-
12 Carottes nature	9	4	3 mn	1	-	-	30 mn	four GN2/1	1	2 mn	1	1	45 mn
13 Crème fraîche	199	1	5 mn	1	2 mn	1	-	-	-	15 mn	3	-	-
14 Crème praliné sans sucre	205	5	8 mn	1	-	-	1h00	Marmite 150lit	1	10 mn	2	1	30 mn
15 Demi pampelousse	15	1	5 mn	1	10 mn	1	-	-	-	5 mn	2	-	-
16 Escalope de volaille	35	4	5 mn	1	-	-	10 mn	sauteuse	1	10 mn	2	-	-
17 Escalope nature	7	4	2 mn	1	-	-	10 mn	sauteuse	1	5 mn	1	1	45 mn
18 Fonds d mmarichauts persillés	149	4	20 mn	1	-	-	1h00	Four /sauteuse	1	20 mn	3	-	-
19 Fonds d mmarichauts nature	2	4	2 mn	1	-	-	45 mn	Four /sauteuse	1	2 mn	1	1	45 mn
20 Gigot	4	1	5 mn	1	5 mn	1	-	-	-	3 mn	1	-	-
21 Gigot nature	3	1	3 mn	1	5 mn	1	-	-	-	2 mn	1	-	-
22 Gougère	20	2	5 mn	1	5 mn	1	45 mn	four GN1/1	1	5 mn	1	1	25 mn
23 Haché de dinde	7	1	2 mn	1	10 mn	1	-	-	-	5 mn	1	-	-
24 Haché de poisson	15	1	3 mn	1	10 mn	1	-	-	-	5 mn	1	-	-
25 Haricots verts sautés sans sel	4	4	2 mn	1	-	-	30 mn	four GN1/1	1	2 mn	1	1	30 mn
26 Haricots verts nature	4	4	2 mn	1	-	-	30 mn	four GN1/1	1	2 mn	1	-	-
27 Haricots verts sautés salés	86	1	10 mn	1	10 mn	1	-	-	-	15 mn	2	-	-
28 Jambon blanc	24	1	5 mn	1	10 mn	1	-	-	-	10 mn	1	-	-
29 Jambon blanc nature	2	1	2 mn	1	2 mn	1	-	-	-	2 mn	1	-	-
30 Lasagnes	840	1	30 mn	2	1h30	3	-	-	-	45 mn	2	-	-
31 Légumes couscous	829	1	30 mn	1	1h15	3	-	-	-	45 mn	2	-	-
32 Macédoine vinaigrette	232	1	15 mn	1	30 mn	1	-	-	-	15 mn	2	-	-
33 Maquereaux vin blanc	6	1	5 mn	1	5 mn	1	-	-	-	5 mn	1	-	-
34 Melon (HO)	1081	1	45 mn	1	1h00	2	-	-	-	1h00	3	-	-
35 Merguez	801	4	40 mn	1	-	-	45 mn	four GN2/1	1	1h00	3	3	45 mn
36 Œufs durs x2	31	1	5 mn	1	5 mn	1	-	-	-	5 mn	1	-	-
37 Œufs durs nature	18	1	3 mn	1	5 mn	1	-	-	-	2 mn	1	-	-
38 Œufs durs vinaigrette x1	86	1	5 mn	1	20 mn	1	-	-	-	10 mn	1	-	-
39 Omelette	112	1	10 mn	1	-	-	-	-	-	15 mn	2	-	-
40 Pané fromager	3	1	3 mn	1	-	-	-	-	-	2 mn	1	-	-
41 Panna cotta framboise	96	2	8 mn	1	1h00	1	-	-	-	10 mn	1	1	30 mn
42 Papillons	244	4	15 mn	1	-	-	40 mn	marmite 400lit	1	30 mn	3	-	-
43 Papillons nature	23	4	5 mn	1	-	-	20 mn	marmite 400lit	1	5 mn	1	2	30 mn
44 Papillons sauce tomates	5	3	2 mn	1	-	-	20 mn	marmite 400lit	1	5 mn	1	-	-
45 Pâté de foie	6	1	3 mn	1	5 mn	1	-	-	-	5 mn	1	-	-
46 Pâté de foie mouliné	6	1	3 mn	1	5 mn	1	-	-	-	5 mn	1	-	-
47 Pavé de saumon	149	4	20 mn	1	-	-	15 mn	four GN2/1	1	20 mn	2	-	-
48 Pavé de saumon nature	23	4	10 mn	1	-	-	15 mn	four GN2/1	1	2 mn	1	1	30 mn
49 Petits pois sans sel	39	4	10 mn	1	-	-	45 mn	four GN1/1	1	10 mn	2	1	45 mn
50 Petits pois nature	11	4	3 mn	1	-	-	40 mn	four GN1/1	1	5 mn	1	-	-
51 Petits pois	866	2	30 mn	1	-	-	1	-	-	1h00	3	-	-
52 Poisson poché	77	4	15 mn	1	-	-	15 mn	four GN2/1	1	10 mn	3	1	30 mn
53 Poisson poché nature	7	4	5 mn	1	-	-	15 mn	four GN2/1	1	2 mn	1	-	-
54 Pommes cuites	24	1	5 mn	1	10 mn	1	-	-	-	-	-	-	-
55 Pommes de terre vinaigrette	30	1	5 mn	1	15 mn	1	-	-	-	-	-	-	-
56 Pommes vapeur	959	1	45 mn	1	30 mn	1	-	-	-	1h15	3	-	-
57 Pommes vapeur nature	13	1	5 mn	1	1 mn	1	-	-	-	5 mn	1	-	-
58 Potage	1200	4	20 mn	1	-	-	2h30	marmite 400lit	1	1h10	2	4	1h15
59 Potage enrichi	550	4	10 mn	1	-	-	2h30	marmite 300lit	1	25 mn	3	1	1h10
60 Pruneaux	3	1	5 mn	1	2 mn	1	-	-	-	-	-	-	-
61 Purée de pommes de terre	503	1	10 mn	1	45 mn	2	-	-	-	30 mn	2	-	-
62 Purée de PdT nature	15	1	2 mn	1	5 mn	1	-	-	-	5 mn	1	1	20 mn
63 Purée de petits pois	274	1	5 mn	1	30 mn	1	-	-	-	30 mn	2	1	20 mn
64 Ratatouille sans sel	24	4	5 mn	1	-	-	40 mn	four GN2/1	1	10 mn	2	-	-
65 Ratatouille nature	5	4	2 mn	1	-	-	40 mn	four GN2/1	1	2 mn	1	1	45 mn
66 Ratatouille mixée sans sel	8	2	3 mn	1	-	-	40 mn	four GN2/1	1	5 mn	1	-	-
67 Ratatouille salée	124	1	15 mn	1	5 mn	1	-	-	-	15 mn	3	1	15 mn
68 Ratatouille mixée salée	265	1	20 mn	1	40 mn	1	-	-	-	30 mn	2	1	20 mn
69 Riz	51	4	5 mn	1	-	-	40 mn	four GN2/1	1	10 mn	2	-	-
70 Riz nature	8	4	5 mn	1	-	-	40 mn	four GN2/1	1	5 mn	1	1	1h00
71 Rosbeef	10	1	5 mn	1	5 mn	1	-	-	-	5 mn	1	-	-
72 Rosbeef nature	1	1	2 mn	1	1 mn	1	-	-	-	5 mn	1	-	-
73 Rôti d mragneau farci aux herbes	885	1	20 mn	1	2h00	1	-	-	-	1h00	2	-	-
74 Rôti de dinde froid	30	1	5 mn	1	15 mn	1	-	-	-	5 mn	1	-	-
75 Rôti de dinde	22	1	4 mn	1	15 mn	1	-	-	-	5 mn	1	-	-
76 Salade coleslaw	850	1	25 mn	1	15 mn	1	-	-	-	1h00	4	-	-
77 Salade coleslaw mixée	280	1	10 mn	1	30 mn	1	-	-	-	20 mn	3	-	-
78 Salade verte	200	1	10 mn	1	5 mn	1	-	-	-	20 mn	3	-	-
79 Semoule couscous 100gr	829	4	20 mn	1	-	-	1h00	marmite 400lit	1	1h00	3	3	1h20
80 Semoule couscous	197	4	5 mn	1	-	-	20 mn	marmite 400lit	1	20 mn	2	1	45 mn
81 Steak haché	24	1	5 mn	1	10 mn	1	-	-	-	10 mn	1	-	-
82 Steak haché nature	4	1	2 mn	1	2 mn	1	-	-	-	2 mn	1	-	-
83 Tomate mixée sans sel	8	1	5 mn	1	10 mn	1	-	-	-	5 mn	1	-	-
84 Jus de viande	351	8	5 mn	1	-	-	30 mn	sauteuse	1	-	-	1	1h00
85 Jus d mragneau	6	8	5 mn	1	-	-	15 mn	rondeau	1	-	-	1	1h00
86 Sauce crème (agneau)	319	8	5 mn	1	-	-	30 mn	sauteuse	1	-	-	1	1h00
87 Fumet	15	8	5 mn	1	-	-	15 mn	sauteuse	1	-	-	1	20 mn
88 Sauce tomate	4	1	2 mn	1	5 mn	1	-	-	-	2 mn	1	1	10 mn

TABLE 6.7 – Importation et stock des données brutes d'une instance dans un fichier Excel.



Plat	Format des barquettes	Quantité	Gamme n°	Production froide				Conditionnement froid				
				Début	Fin	Plan de travail	Nb d'agent	Début	Fin	Matériel	Nb d'agent	
1	LEGUMES POT-AU-FEU	1/2 lune	180	1	07:25	07:35	Plan 1	3	07:35	07:45	O <sup>2</sup>	3
2	CREME FRAICHE	BOH	198	1	07:25	07:30	Plan 2	1	07:45	07:52	O <sup>2</sup>	3
3	DEMI PAMPELMOUSSE	BOH	54	1	07:35	07:45	Plan 1	1	07:52	07:55	O <sup>2</sup>	3
4	JAMBON NATURE	BOH	2	1	07:45	07:46	Plan 2	1	07:55	07:56	O <sup>2</sup>	2
5	JAMBON	BOH	22	1	07:46	07:55	Plan 1	1	07:56	08:00	O <sup>2</sup>	2
6	PRUNEAUX	BOH	12	1	07:55	08:00	Plan 2	1	08:00	08:05	O <sup>2</sup>	2
7	ROSBEEF	BOH	25	1	-	-	-	-	08:05	08:10	O <sup>2</sup>	3
8	PATE DE FOIE	BOH	13	1	-	-	-	-	08:10	08:14	O <sup>2</sup>	3
9	PATE DE FOIE MOULINE	BOH	19	1	-	-	-	-	08:14	08:18	O <sup>2</sup>	3
10	TARTE NORMANDE	BOH-GN1/4	784	1	07:30	08:18	Plan 3	2	8:18	8:32	O <sup>2</sup>	3
11	CEUFS VINAIGRETTE	BOH	32	1	08:20	08:30	Plan 1	2	08:32	08:36	O <sup>2</sup>	2
12	CEUFS DURS	BOH	21	1	08:32	08:36	Plan 1	2	08:36	08:38	O <sup>2</sup>	2
13	CEUFS NATURE	BOH	10	1	08:36	08:38	Plan 1	2	08:38	08:39	O <sup>2</sup>	2
14	MAQUEREAUX	BOH	6	1	08:36	08:39	Plan 1	1	08:39	08:41	O <sup>2</sup>	2
15	SAUCE TOMATE	BOH	6	1	08:36	08:41	Plan 2	1	08:41	08:43	O <sup>2</sup>	2
16	BARQUETTE DE SAUCE	BOH	65	1	08:38	08:43	Plan 3	1	08:43	08:50	O <sup>2</sup>	3
17	POMMES VAPEUR NATURE	BOH	4	1	08:48	08:50	Plan 2	1	08:50	08:51	O <sup>2</sup>	2
18	POMMES VAPEUR	BOH	12	1	08:50	08:56	Plan 2	1	08:56	09:00	O <sup>2</sup>	2
19	POMMES CUITES	BOH	124	1	08:50	09:00	Plan 3	2	09:00	09:10	O <sup>2</sup>	2
20	TERRINE DE LEGUMES	BOH	34	1	08:55	09:10	Plan 1	2	09:10	09:14	O <sup>2</sup>	2
21	TERRINE DE LEGUMES NATURE	BOH	2	1	09:10	09:11	Plan 1	2	09:14	09:15	O <sup>2</sup>	2
22	SALADE VERTE	BOH	283	1	09:11	09:15	Plan 2	1	09:15	09:25	O <sup>2</sup>	4
23	PÉMONTAISE	BOH	28	1	09:15	09:18	Plan 2	2	09:25	09:28	O <sup>2</sup>	2
24	SARDINES	BOH	18	1	09:18	09:20	Plan 1	2	09:28	09:35	O <sup>2</sup>	2
25	SALADE CHOU BLANC	BOH-GN1/4	1066	1	09:20	10:00	Plan 2	2	10:00	11:00	O <sup>2</sup>	4
26	SALADE CHOU BLANC	GN1/4	32	1	10:00	10:05	Plan 2	2	11:00	11:04	O <sup>2</sup>	4
27	ROTI DE PORC SCE	GN1/4	159	1	-	-	-	-	11:04	11:12	O <sup>2</sup>	3
28	HACHE PORC SCE VIGNERONNE	1/2 LUNE-GN1/4	339	1	-	-	-	-	11:12	11:27	O <sup>2</sup>	3
29	HACHE DE DINDE NATURE	1/2 LUNE	2	1	-	-	-	-	11:27	11:28	O <sup>2</sup>	2
30	HACHE DE DINDE	1/2 LUNE	31	1	-	-	-	-	11:28	11:32	O <sup>2</sup>	2
31	HACHE DE PORC	1/2 LUNE	1	1	-	-	-	-	11:32	11:33	O <sup>2</sup>	2
32	HACHE POSS SCE AURORE	1/2 LUNE	16	1	-	-	-	-	11:33	11:35	O <sup>2</sup>	2
33	OMELETTE	1/2 lune	34	1	11:30	11:35	Plan 1	1	11:35	11:37	O <sup>2</sup>	2
34	PUREE DE CELERI	BOH-GN1/4	262	1	11:05	11:30	Plan 2	1	11:37	11:45	O <sup>2</sup>	3
35	PUREE DE HARCOTS BEURRE	BOH-GN1/4	261	2	11:05	11:40	Plan 3	1	11:45	12:00	O <sup>2</sup>	3
36	PUREE DE PDT NATURE	BOH-PESEE	16	1	12:25	12:30	Plan 1	3	12:30	12:35	O <sup>2</sup>	3
37	PUREE DE PDT	BOH-GN1/4	451	1	11:40	12:25	Plan 2	3	12:35	13:10	O <sup>2</sup>	3
38	ARRICOTS AU SIROP	BOH-GN1/4	687	1	12:50	13:10	Plan 3	3	13:10	13:45	O <sup>2</sup>	4
Tranchage												
39	ROSBEEF	BOH	25	1	07:25	07:40	Boucherie	1	-	-	-	-
40	PATE DE FOIE	BOH	13	1	07:40	07:50	Boucherie	1	-	-	-	-
41	PATE DE FOIE MOULINE	BOH	19	1	07:50	08:00	Boucherie	1	-	-	-	-
42	HACHE PORC SCE VIGNERONNE	1/2 LUNE-GN1/4	339	1	8:50	10:20	Boucherie	1	-	-	-	-
43	ROTI DE PORC SCE	GN1/4	159	1	10:20	10:45	Boucherie	1	-	-	-	-
44	HACHE DE DINDE NATURE	1/2 LUNE	2	1	11:14	11:15	Boucherie	1	-	-	-	-
45	HACHE DE DINDE	1/2 LUNE	31	1	11:00	11:14	Boucherie	1	-	-	-	-
46	HACHE DE PORC	1/2 LUNE	1	1	11:25	11:26	Boucherie	1	-	-	-	-
47	HACHE POSS SCE AURORE	1/2 LUNE	16	1	11:15	11:25	Boucherie	1	-	-	-	-
Pâtisserie												
48	CEUF MIXE	BOH	12	1	08:00	08:15	Plan 4	1	08:15	08:16	S602	2
49	TARTE A L'ONION	GN1/4	60	2	-	-	Plan 4	-	10:30	10:45	Plaque	1

TABLE 6.8 – Poste de production froide.

Plat	Format des barquettes	Quantité	Gamme n°	Production chaude				Conditionnement chaud				Refroidissement				
				Début	Fin	Matériel	Nb d'agent	Début	Fin	Matériel	Nb d'agent	Début	Fin	Machine	Nb d'agent	
1	JUS DE VIANDE	Plaque GN1/1	206	8	6:35	7:00	Sauteuse 1	1	-	-	-	-	7:00	08:00	Cellule 1	1
2	SAUCE AURORE (MD)	Plaque GN1/1	16	8	6:35	7:00	Sauteuse 2	1	-	-	-	-	7:00	08:00	Cellule 1	1
3	ESCALOPE VOLAILLE	1/2 lune-GN1/4	40	4	6:35	6:55	Four 1 (GN1/1)	1	6:55	7:05	O <sup>2</sup> S2000	3	7:05	08:05	Cellule 4	1
4	ESCALOPE VOLAILLE NATURE	1/2 lune	9	4	6:35	6:55	Four 1 (GN1/1)	1	6:55	7:05	O <sup>2</sup>	3	7:05	08:05	Cellule 4	1
5	POISSON POICHE	1/2 lune-GN1/4	270	4	6:35	7:05	Four 1 (GN2/1)	1	7:05	7:30	O <sup>2</sup> S2000	4	7:30	08:10	Cellule 2	1
6	POISSON POICHE NATURE	1/2 lune	14	4	6:35	7:05	Four 1 (GN2/1)	1	7:05	7:20	O <sup>2</sup>	3	7:30	08:10	Cellule 2	1
7	COQUILLETES	1/2 lune-GN1/4	188	4	7:05	7:30	Sauteuse 2,3	1	7:30	7:50	O <sup>2</sup> S2000	3	7:50	08:50	Cellule 3	1
8	COQUILLETES NATURE	1/2 lune	13	4	7:05	7:30	Sauteuse 2,3	1	7:30	7:35	O <sup>2</sup>	3	7:50	08:50	Cellule 3	1
9	COQUILLETES SCE TOMATE	1/2 lune	4	4	7:05	7:30	Sauteuse 2,3	1	7:35	7:37	O <sup>2</sup>	3	7:50	08:50	Cellule 3	1
10	CAROTTES VICHY NATURE	1/2 lune	5	4	7:05	7:35	Four 2 (GN1/1)	1	7:37	7:39	O <sup>2</sup>	3	7:50	08:40	Cellule 3	1
11	CAROTTES VICHY	1/2 lune	64	4	7:05	7:35	Four 2 (GN1/1)	1	7:39	7:50	O <sup>2</sup>	3	7:50	08:40	Cellule 3	1
12	H.BEURRE NATURE	1/2 lune	7	4	7:15	7:50	Four 2 (GN2/1)	1	7:53	7:56	O <sup>2</sup>	3	8:30	09:10	Cellule 12,5	1
13	H.BEURRE S/SEL	1/2 lune	37	4	7:15	7:50	Four 2 (GN2/1)	1	7:56	8:05	O <sup>2</sup>	4	8:30	09:10	Cellule 12,5	1
14	H.BEURRE	1/2 lune-GN1/4	1171	4	7:15	7:50	Four 2,3 (GN2/1)	1	7:50	8:30	O <sup>2</sup> S2000	4	8:30	09:10	Cellule 12,5	1
15	PUREE DE HARCOTS BEURRE	-	261	2	7:15	7:50	Four 1 (GN2/1)	1	-	-	-	-	8:40	09:20	Cellule 3	1
16	HVERTS SAUTES	1/2 lune	114	4	7:55	8:05	BAC	1	8:05	8:20	O <sup>2</sup>	4	8:30	09:10	Cellule 6	1
17	HVERTS NATURE	1/2 lune	7	4	7:15	7:50	Four 2 (GN2/1)	1	7:50	7:53	O <sup>2</sup>	3	8:30	09:10	Cellule 6	1
18	RIZ NATURE	1/2 lune	13	4	8:10	8:20	Four 1 (GN2/1)	1	8:20	8:23	O <sup>2</sup>	4	8:50	09:10	Cellule 4	1
19	RIZ	1/2 lune	68	4	7:50	8:20	Four 1 (GN2/1)	1	8:23	8:30	O <sup>2</sup>	4	8:50	09:10	Cellule 4	1
20	RIZ PILAF	1/2 lune-GN1/4	191	4	7:50	8:20	Four 1 (GN2/1)	1	8:30	8:50	O <sup>2</sup> S2000	3	8:50	09:10	Cellule 4	1
21	RIZ PILAF	1/2 lune-GN1/4-PESEE	1126	4	8:10	8:50	Four 2,3 (GN2/1)	1	8:50	9:55	O <sup>2</sup> S2000	5	9:55	10:45	Cellule 12,3	1
22	SAUTE DE CANARD A L'ORANGE	Plaque GN1/1-GN1/4	120	4	7:55	9:55	Sauteuse 1	1	9:55	10:15	O <sup>2</sup> S2000	3	10:15	11:05	Cellule 5	1
23	BURGER DE VEAU	1/2 lune	33	4	8:25	8:40	Four 3 (GN1/1)	1	8:45	8:50	O <sup>2</sup>	4	9:10	09:50	Cellule 6	1
24	VIANDE HACHEE AUX AROMATES	1/2 lune	60	4	8:25	8:40	Four 3 (GN1/1)	1	8:50	9:00	O <sup>2</sup>	3	9:10	09:50	Cellule 6	1
25	POREEE CELTIQUE	Plaque GN1/1	120	4	8:25	9:00	Four 2 (GN1/1) Sauteuse 2	1	9:00	9:10	Plaque	1	9:10	09:50	Cellule 6	1
26	SAUCE VIGNERONNE	Plaque GN1/1	339	8	8:40	9:10	Sauteuse 3	1	-	-	-	-	9:10	10:10	Cellule 4,5	1
27	PORREAUX BRASES	1/2 lune-GN1/4	192	4	9:30	10:15	Four 1 (GN2/1)	1	10:15	10:45	O <sup>2</sup> S2000	3	10:45	11:45	Cellule 1	1
28	PORREAUX NATURE	1/2 lune	7	4	9:30	10:15	Four 1 (GN2/1)	1	10:15	10:18	O <sup>2</sup>	3	10:45	11:45	Cellule 1	1
29	SAUCE TOMATE (MD)	Plaque GN1/1	1200	4	10:15	10:35	-	1	-	-	-	-	-	-	-	-
30	QUELLES SCE TOMATE	GN1/4-1/2 lune	1200	4	10:05	10:45	Four 2,3 (GN2/1)	1	10:45	11:35	O <sup>2</sup> S2000	5	11:35	12:25	Cellule 2,3,4,6	1
31	COTE DE PORC NATURE	1/2 lune	18	4	10:08	10:18	Sauteuse 2	1	10:18	10:23	O <sup>2</sup>	3	10:45	11:45	Cellule 1	1
32	COTE DE PORC	1/2 lune	30	4	10:08	10:18	Sauteuse 2	1	10:23	10:35	O <sup>2</sup>	3	10:45	11:45	Cellule 1	1
33	COTE DE PORC VIGNERONNE	1/2 lune-GN1/4	1037	4	10:35	11:35	Sauteuse 1,2,3	3	11:35	12:25	O <sup>2</sup> S2000	4	12:25	13:25	Cellule 12,3	1
34	POTAGE ENRICH	BOL-GN1/4	280	4	8:25	12:25	Marmite 300 L	1	12:25	12:45	O <sup>2</sup> S2000	3	12:45	13:55	Cellule 4,5	1
35	POTAGE	BOL-GN1/4	800	4	8:25	12:25	Marmite 400 L	1	12:45	13:25	O <sup>2</sup> S2000	3	13:25	14:25	Cellule 12,3	1
Pâtisserie																
36	CREME VANILLE S/SUCRE	COUPELLE	223	5	6:40	7:40	Marmite 150 L	1	8:30	8:45	O <sup>2</sup>	3	07:40	08:30	Cellule 5,6	1
37	TARTE A L'ONION	GN1/4	60	2	09:10	9:50	Four 1 (GN1/1)	1	-	-	-	-	09:50	10:30	Cellule 7	1

TABLE 6.9 – Poste de production chaude.

TABLE 6.10 – Exemple de planning d'une journée de production obtenu avec l'algorithme génétique.

Plat	Format des barquettes	Quantité	Gamme n°	Début		Fin	Nb d'agent	Début		Fin	Matériel	Nb d'agent
				Début	Fin			Début	Fin			
1 LEGUMES POT-AU-FEULLE	1/2 lune	180	1	07:25	07:35	07:45	1	07:15	07:45	07:45	07	15
2 CREME FRAICHE	BOH	198	1	07:25	07:30	07:45	1	07:45	07:52	07:52	07	12
3 DEMI PAMPROUSSE	BOH	94	1	07:30	07:45	07:55	1	07:52	07:55	07:55	07	12
4 JAMBON NATURE	BOH	2	1	07:35	07:45	07:55	1	07:55	07:55	07:55	07	12
5 JAMBON	BOH	22	1	07:45	07:55	08:05	1	07:56	08:05	08:05	07	12
6 PRUNEAUX	BOH	12	1	07:55	08:00	08:05	1	08:00	08:05	08:05	07	12
7 ROSBEEF	BOH	25	3	08:05	08:10	08:15	3	08:05	08:10	08:15	07	12
8 PATE DE FOIE	BOH	13	1	08:10	08:15	08:20	1	08:10	08:15	08:20	07	12
9 PATE DE FOIE MOULINE	BOH	19	1	08:15	08:20	08:25	1	08:15	08:20	08:25	07	12
10 TARTE NORMANDE	BOH-GN1/4	784	3	07:30	08:15	08:30	2	08:15	08:30	08:30	07	12
11 CEUX VINAIGRETTE	BOH	32	3	08:20	08:30	08:35	2	08:20	08:35	08:35	07	2
12 CEUX DURS	BOH	21	3	08:32	08:35	08:40	2	08:35	08:40	08:40	07	2
13 CEUX NATURE	BOH	10	1	08:35	08:40	08:45	2	08:35	08:40	08:45	07	2
14 MAQUERAUX	BOH	6	1	08:40	08:45	08:50	1	08:40	08:45	08:50	07	2
15 SAUCE TOMATE	BOH	6	1	08:40	08:45	08:50	1	08:41	08:45	08:50	07	2
16 BARQUETTES DE SAUCE	BOH	65	3	08:38	08:41	08:44	1	08:41	08:50	08:50	07	2
17 POMMES VAPEUR NATURE	BOH	4	1	08:48	08:50	08:52	1	08:50	08:52	08:52	07	2
18 POMMES VAPEUR	BOH	32	1	08:50	08:55	09:00	1	08:50	08:55	09:00	07	2
19 POMMES CLUTES	BOH	124	1	08:50	09:00	09:10	2	09:00	09:10	09:10	07	2
20 TERRINE DE LEGUMES	BOH	34	1	08:55	09:10	09:20	2	09:10	09:14	09:14	07	2
21 TERRINE DE LEGUMES NATURE	BOH	2	3	09:10	09:11	09:12	2	09:14	09:14	09:14	07	2
22 SALADE VERTE	BOH	283	3	09:10	09:15	09:20	1	09:15	09:20	09:20	07	4
23 PIEMONTAISE	BOH	28	1	09:15	09:20	09:25	2	09:25	09:28	09:28	07	2
24 SARDINES	BOH	18	1	09:18	09:20	09:22	2	09:20	09:25	09:25	07	2
25 SALADE CHOU BLANC	BOH-GN1/4	1066	3	09:00	10:00	11:00	2	09:50	11:00	11:00	07	4
26 SALADE CHOU BLANC EMMENTAL	GN1/4	92	1	10:00	10:05	10:10	2	10:05	10:10	10:10	07	12
27 ROTI DE PORC SEC VIGNERONNE	GN1/4	159	1	11:00	11:10	11:20	1	11:04	11:17	11:17	07	3
28 HACHE PORC SEC VIGNERONNE	1/2 LUNE-GN1/4	339	1	11:10	11:20	11:30	1	11:13	11:22	11:22	07	3
29 HACHE DE DINDE NATURE	1/2 LUNE	2	1	11:20	11:25	11:30	1	11:23	11:28	11:28	07	2
30 HACHE DE DINDE	1/2 LUNE	31	1	11:25	11:30	11:35	1	11:28	11:33	11:33	07	2
31 HACHE DE PORC	1/2 LUNE	1	1	11:30	11:35	11:40	1	11:33	11:38	11:38	07	2
32 HACHE PORC SEC AUREORE	1/2 LUNE	16	1	11:35	11:40	11:45	1	11:38	11:43	11:43	07	2
33 OMELETTE	1/2 lune	34	3	11:00	11:15	11:30	1	11:35	11:37	11:37	07	2
34 PUREE DE CELERI	BOH-GN1/4	262	1	11:05	11:30	11:55	1	11:37	11:45	11:45	07	3
35 PUREE DE HARCOTS/BEURRE	BOH-GN1/4	264	2	11:05	11:30	11:55	1	11:45	12:00	12:00	07	3
36 PUREE DE PDT NATURE	BOH-PESEE	16	1	12:25	12:30	12:35	3	12:30	12:35	12:35	07	3
37 PUREE DE PDT	BOH-GN1/4-PESEE	451	1	12:50	12:55	13:00	3	12:55	13:10	13:10	07	3
38 ABRICOTS AU SIROP	BOH-GN1/4	687	1	12:50	13:10	13:30	3	13:10	13:30	13:30	07	4

Plat	Format des barquettes	Quantité	Gamme n°	Début		Fin	Matériel	Nb d'agent	Début	Fin	Matériel	Nb d'agent
				Début	Fin							
1 JUS DE VIANDE	Plaque GN1/1	206	8	6:35	7:00	7:00	Sauteuse 1	1	-	-	-	-
2 SAUCE AUREORE (MAX)	Plaque GN1/1	16	8	6:35	7:00	7:00	Sauteuse 2	1	-	-	-	-
3 ESCALOPE VOLAILLE	1/2 lune-GN1/4	40	4	6:35	6:55	6:55	Four 1 (GN1/1)	1	6:55	7:05	0°-52000	12
4 ESCALOPE VOLAILLE NATURE	1/2 lune	9	4	6:35	6:55	6:55	Four 1 (GN1/1)	1	6:55	7:05	0°	12
5 POISSON POCHÉ	1/2 lune-GN1/4	270	4	6:35	7:05	7:05	Four 1 (GN1/1)	1	7:05	7:30	0°-52000	13
6 POISSON POCHÉ NATURE	1/2 lune	14	4	6:35	7:05	7:05	Four 1 (GN1/1)	1	7:05	7:30	0°	12
7 COQUILLETES	1/2 lune-GN1/4	188	4	7:05	7:30	7:30	Sauteuse 2,3	1	7:30	7:45	0°-52000	12
8 COQUILLETES NATURE	1/2 lune	13	4	7:05	7:30	7:30	Sauteuse 2,3	1	7:30	7:35	0°	12
9 COQUILLETES SCE TOMATE	1/2 lune	4	4	7:05	7:30	7:30	Sauteuse 2,3	1	7:35	7:37	0°	12
10 CAROTTES VICHY NATURE	1/2 lune	5	4	7:05	7:35	7:35	Four 2 (GN1/1)	1	7:37	7:39	0°	12
11 CAROTTES VICHY	1/2 lune	64	4	7:05	7:35	7:35	Four 2 (GN1/1)	1	7:38	7:40	0°	3
12 H.BEURRE NATURE	1/2 lune	7	4	7:15	7:50	7:50	Four 2 (GN1/1)	1	7:50	7:53	0°	3
13 H.BEURRE S/SEL	1/2 lune	37	4	7:15	7:50	7:50	Four 2 (GN1/1)	1	7:56	8:00	0°	13
14 H.BEURRE	1/2 lune-GN1/4	1171	4	7:15	7:50	7:50	Four 2,3 (GN1/1)	1	7:50	8:05	0°-52000	13
15 PUREE DE HARCOTS BEURRE	-	261	2	7:15	7:50	7:50	Four 1 (GN1/1)	1	-	-	-	-
16 HVERTS SAUTES	1/2 lune	114	4	7:55	8:05	8:05	BAC	1	8:05	8:20	0°	13
17 HVERTS NATURE	1/2 lune	7	4	7:55	8:05	8:05	Four 2 (GN1/1)	1	7:53	7:56	0°	12
18 RIZ NATURE	1/2 lune	13	4	8:10	8:20	8:20	Four 1 (GN1/1)	1	8:20	8:23	0°	13
19 RIZ	1/2 lune	68	4	7:50	8:20	8:20	Four 1 (GN1/1)	1	8:21	8:30	0°	13
20 RIZ PILAF ***	1/2 lune-GN1/4	191	4	7:50	8:20	8:20	Four 1 (GN1/1)	1	8:30	8:50	0°-52000	3
21 RIZ PILAF	1/2 lune-GN1/4-PESEE	1126	4	8:10	8:50	8:50	Four 2,3 (GN1/1)	1	8:50	8:55	0°-52000	5
22 SAUTE DE CANARD A L'ORANGE	Plaque GN1/1-GN1/4	120	4	7:55	9:55	9:55	Sauteuse 1	1	9:55	10:15	0°-52000	3
23 CROQUENOT DE VEAU	1/2 lune	65	4	8:40	9:40	9:40	Four 3 (GN1/1)	1	9:40	9:45	0°	12
24 VIANDE HACHEE AUX AROMATES	1/2 lune	60	4	8:40	9:40	9:40	Four 3 (GN1/1)	1	9:40	9:45	0°	3
25 POULEE CRETIVE	Plaque GN1/1	120	4	8:40	9:40	9:40	Four 2 (GN1/1)	1	9:40	9:45	Plaque 1	1
26 SAUCE VIGNERONNE	Plaque GN1/1	339	8	8:40	9:15	9:15	Sauteuse 3	1	-	-	-	-
27 POIREAUX BRAISES	1/2 lune-GN1/4	192	4	9:30	10:15	10:15	Four 1 (GN1/1)	1	10:15	10:45	0°-52000	3
28 POIREAUX NATURE	1/2 lune	7	4	9:30	10:15	10:15	Four 1 (GN1/1)	1	10:15	10:18	0°	3
29 SAUCE TOMATE (MAX)	Plaque GN1/1	1200	4	10:15	10:35	10:35	-	1	-	-	-	-
30 QUENELLES SCE TOMATE	GN1/4-1/2 lune	1200	4	10:05	10:45	10:45	Four 2,3 (GN1/1)	1	10:45	11:35	0°-52000	5
31 COTE DE PORC NATURE	1/2 lune	18	4	10:08	10:18	10:18	Sauteuse 2	1	10:18	10:23	0°	3
32 COTE DE PORC	1/2 lune	30	4	10:08	10:18	10:18	Sauteuse 2	1	10:23	10:35	0°	3
33 COTE DE PORC VIGNERONNE	1/2 lune-GN1/4	1037	4	10:35	11:35	11:35	Sauteuse 1,2,3	3	11:35	12:00	0°-52000	15
34 POTAGE ENRICH	BOH-GN1/4	280	4	8:35	12:25	12:25	Marmite 300L	1	12:25	12:45	0°-52000	3
35 POTAGE	BOH-GN1/4	800	4	8:35	12:25	12:25	Marmite 400L	1	12:45	13:25	0°-52000	3
36 CREME VANILLE S/SUCRE	COUPELLE	223	5	9:40	7:40	7:40	Marmite 150L	1	8:30	8:45	0°	3
37 TARTE A L'ONION	GN1/4	60	2	09:10	9:50	9:50	Four 1 (GN1/1)	1	-	-	-	-

TABLE 6.11 – Suivi du déroulement d'une journée test de production et collecte des temps opératoires réels.

### 6.4 Tests sur des journées réelles de production

La Table 6.12 présente les résultats des tests de l'algorithme génétique sur des journées réelles de production, avec une comparaison entre les solutions réelles, telles que ces journées de production ont été organisées et les solutions proposées par l'algorithme génétique. Les solutions réelles sont obtenues, après avoir recueilli les données sur les heures réelles de fin de préparation des plats. Ces dernières ont été comparées avec les heures de fin de préparation des plats dans les solutions proposées par l'algorithme génétique. Dans ce tableau, pour chaque instance, le nombre de plats, le nombre de lots des plats, le nombre total d'opérations, le nombre de machines disponibles et le nombre moyen des repas produits par jour sont donnés. L'indicateur de performance ou le critère de comparaison entre les solutions est basé sur le temps de présence total des tâches  $\sum_i C_i$  dans le système de production et le gap entre les solutions. La Figure 6.2 présente les pourcentages d'amélioration obtenues avec l'algorithme génétique pour chaque instance.

	Ins. 1	Ins. 2	Ins. 3	Ins. 4	Ins. 5	Ins. 6
- Nombre de plats	82	110	62	78	58	80
- Nombre de lots	92	115	68	84	65	88
- Nombre d'opérations	370	392	218	362	215	365
- Nombre de machines	29	29	29	29	29	29
- Nombre moyen de repas produits	4 800	4 800	4 800	4 800	4 800	4 800
- Solutions réelles *	901,97 h	1062,66 h	278,23 h	784,84 h	522,58 h	665,06 h
- Solutions proposées **	788,64 h	952,48 h	226,12 h	705,96 h	457,26 h	590,63 h
- Gaps entre * et **	12,56 %	10,36 %	18,72 %	11,18 %	14,28 %	12,60 %

TABLE 6.12 – Résultats de comparaison entre les solutions réelles et les solutions de l'algorithme génétique sur des journées réelles de production.

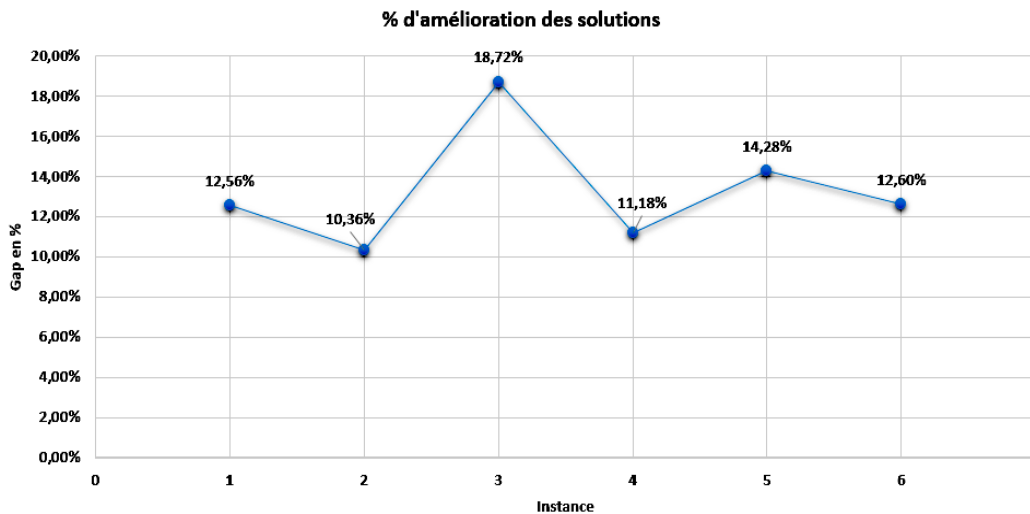


FIGURE 6.2 – Pourcentages d'amélioration des solutions réelles.

À partir des résultats présentés dans la Table 6.12 et la Figure 6.2, on remarque que les gaps entre les solutions réelles et celles de l'algorithme génétique sont importants et significatifs. Il est important de noter que la performance de l'algorithme génétique dépend du type des instances et de leurs tailles. À titre d'exemple, pour l'instance avec 62 plats, 68 lots, 218 opérations et 29 machines, l'algorithme génétique a apporté une amélioration considérable de 18,72 % par rapport à la solution réelle.

Les résultats d'analyse et de comparaison des solutions réelles et celles de l'algorithme génétique montrent que les écarts importants entre les solutions sont dus particulièrement à l'affectation optimale des opérations aux ressources matérielles dans les solutions de l'algorithme génétique, notamment les cellules de refroidissement, ce qui permet d'améliorer considérablement le critère d'optimisation par rapport aux solutions réelles, dans lesquelles les opérations sont affectées aléatoirement aux machines. De plus, dans les solutions réelles, pour réduire le nombre de fois de changement d'outils, les plats peuvent attendre (dans certains cas jusqu'à 3h) en chambres froides

entre la fin de la préparation et le début du conditionnement. À la différence, dans les solutions proposées, les temps d'attente entre les opérations consécutives sont minimisés, ce qui justifie les gaps importants entre les solutions réelles et proposées, et les gains de temps obtenus avec les solutions de l'algorithme génétique.

Il est également à noter que lors du déroulement de quelques journées test, des écarts ont été constatés entre les temps opératoires mesurés et réels, ceci a été dû principalement au manque d'agents présents sur les postes de travail et à l'indisponibilité des matières premières, ce qui a engendré des décalages par rapport aux heures de début et de fin de traitement des opérations indiquées dans les plannings proposés. Les résultats du déroulement des essais sur terrain, ont montré que les aléas tels que l'absence du personnel, la panne des machines, l'indisponibilité des matières premières, influencent les résultats d'application des algorithmes développés.

## 6.5 Étude de l'impact d'intégration des temps de pause

Les horaires de travail des agents sont de 7h30 par jour avec 10 min de pause-café entre l'intervalle de temps 09h30 et 10h00, et 30 min de pause-midi entre la plage horaire 11h30 et 12h30. La gestion des temps de pauses s'effectue par la répartition des agents en deux équipes qui prennent leur pause consécutivement, tel que le montre la Figure 6.3 :

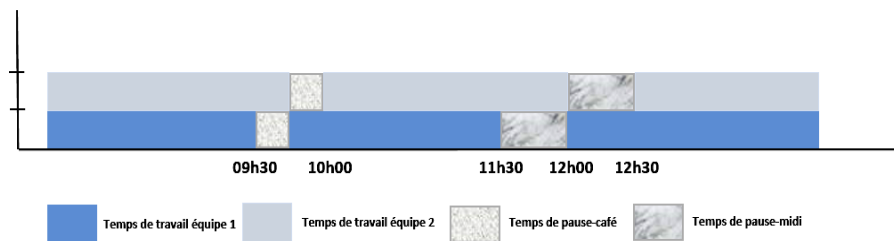


FIGURE 6.3 – Temps de travail et de pauses journaliers des agents.

Dans le but d'alléger la charge de travail sur les plages horaires de pause, on a considéré les hypothèses suivantes qui sont intégrées dans la fonction décodage des solutions :

- aucune opération ne peut commencer sur les intervalles des temps de pause, sauf l'opération du refroidissement, qui ne peut pas s'arrêter tout au long du processus de production.
- une opération peut commencer avant la pause et se terminer entre les temps de pause.
- le nettoyage des ressources peut se faire entre les plages horaires de pauses.
- la préparation des ressources ne peut pas se faire entre les intervalles des temps de pause, elle peut commencer qu'après les pauses.

Afin d'étudier l'impact d'intégration des temps de pause sur la qualité des solutions et sur la charge de travail sur les intervalles des temps de pauses, une étude est effectuée sur un ensemble d'instances de types et de tailles différents. La charge de travail est quantifiée en termes de nombre

de ressources humaines et matérielles utilisées, et en termes de pourcentages des temps d'occupation de ces ressources sur les plages horaires de pauses.

Les Tables 6.13, 6.14 et 6.15 présentent les résultats de cette étude sur ces différentes instances. Pour chaque instance, le nombre de tâches, le nombre de lots, le nombre d'opérations et le nombre de machines sont donnés. Les solutions sans et après l'intégration des temps de pauses avec le gap entre elles sont présentées, pour l'ensemble des instances, ainsi que le nombre de ressources humaines et matérielles utilisées sur les intervalles des temps de pauses et les pourcentages des temps de leurs occupations.

Jobs	Lots	Opérations	Machine	Impact sur la qualité des solutions			Estimation de la charge de travail sur les intervalles des temps de pause				Pourcentage des temps d'occupation des ressources humaines et matérielles sur les intervalles des temps de pause	
				Solutions sans intégration des temps de pause	Solutions après intégration des temps de pause	Gap en (%) entre les solutions	Nombre de ressources humaines et matérielles utilisées sur les intervalles des temps de pause		Temps d'occupation des ressources humaines et matérielles sur les intervalles des temps de pause			
							Sans temps de pause	Avec temps de pause	Sans temps de pause	Avec temps de pause		
1	2	2	10	29	15,32	15,37	0,3263	25	10	60 mn	24 mn	40%
2	3	3	15	29	24,41	24,52	0,4506	25	10	60 mn	24 mn	40%
3	4	4	20	29	32,83	33	0,5178	25	10	60 mn	25 mn	41,67%
4	5	5	24	29	39,92	40,18	0,6513	25	11	60 mn	26 mn	43,33%
5	6	6	29	29	49,2	49,57	0,7521	26	12	60 mn	27 mn	45%
6	7	7	34	29	57,62	58,12	0,8677	26	12	60 mn	27 mn	45%
7	8	10	39	29	69,41	70,03	0,8932	26	12	60 mn	27 mn	45%
8	9	11	44	29	77,7	78,42	0,9266	27	13	60 mn	28 mn	46,67%
9	10	12	48	29	85	85,84	0,9882	27	13	60 mn	28 mn	46,67%
10	20	22	93	29	162,42	164,05	1,0036	27	14	60 mn	30 mn	50%
11	30	32	138	29	252,93	255,52	1,0239	27	14	60 mn	31 mn	51,67%
12	40	42	179	29	339,74	343,38	1,0714	28	15	60 mn	32 mn	53,33%
13	50	58	227	29	471,62	476,78	1,0941	28	15	60 mn	33 mn	55%
14	60	68	271	29	590,41	596,95	1,1077	29	15	60 mn	33 mn	55%
15	70	78	315	29	677,64	685,19	1,1142	29	16	60 mn	34 mn	56,67%
16	82	92	370	29	788,63	797,85	1,1691	29	16	60 mn	35 mn	58,33%

TABLE 6.13 – Résultats sur des instances réelles du CHT.

Jobs	Lots	Opérations	Machine	Impact sur la qualité des solutions			Estimation de la charge de travail sur les intervalles des temps de pause				Pourcentage des temps d'occupation des ressources humaines et matérielles sur les intervalles des temps de pause	
				Solutions sans intégration des temps de pause	Solutions après intégration des temps de pause	Gap en (%) entre les solutions	Nombre de ressources humaines et matérielles utilisées sur les intervalles des temps de pause		Temps d'occupation des ressources humaines et matérielles sur les intervalles des temps de pause			
							Sans temps de pause	Avec temps de pause	Sans temps de pause	Avec temps de pause		
1	10	10	132	6	285,2	288,2	1,0518	5	3	60 mn	26 mn	43,33%
2	15	15	168	7	302,03	305,19	1,0562	6	4	60 mn	28 mn	46,67%
3	20	20	146	8	320,14	323,5	1,0621	6	5	60 mn	29 mn	48,33%
4	25	25	154	9	332,02	335,55	1,0692	8	6	60 mn	31 mn	51,67%
5	30	30	151	10	337,81	341,42	1,0716	9	7	60 mn	33 mn	55%
6	35	35	149	11	353,83	357,62	1,0797	10	8	60 mn	34 mn	56,67%
7	40	40	179	12	364,62	368,54	1,0806	11	8	60 mn	34 mn	56,67%
8	45	45	221	13	381,01	385,14	1,0866	12	9	60 mn	35 mn	58,33%
9	50	50	191	14	395	399,3	1,0886	14	10	60 mn	36 mn	60%
10	55	55	205	15	412,74	417,21	1,0934	15	10	60 mn	36 mn	60%
11	60	60	195	16	434,23	438,95	1,0952	16	12	60 mn	36 mn	60%
12	65	65	201	17	448,52	453,42	1,0969	17	13	60 mn	37 mn	61,67%
13	70	70	256	18	460,81	465,89	1,1046	18	14	60 mn	37 mn	61,67%
14	75	75	258	19	485,65	490,97	1,1058	19	15	60 mn	38 mn	63,33%
15	80	80	300	20	498,04	503,53	1,1105	20	15	60 mn	38 mn	63,33%

TABLE 6.14 – Résultats sur des instances générées aléatoirement de grandes tailles.



Jobs	Lots	Opérations	Machine	Impact sur la qualité des solutions			Estimation de la charge de travail sur les intervalles des temps de pause				Pourcentage des temps d'occupation des ressources humaines et matérielles sur les intervalles des temps de pause	
				Solutions sans intégration des temps de pause	Solutions après intégration des temps de pause	Gap en (%) entre les solutions	Nombre de ressources humaines et matérielles utilisées sur les intervalles des temps de pause		Temps d'occupation des ressources humaines et matérielles sur les intervalles des temps de pause			
							Sans temps de pause	Avec temps de pause	Sans temps de pause	Avec temps de pause		
1	110	110	402	29	986,2	999,55	1,3536	29	18	60 mn	38 mn	63,33%
2	100	100	342	29	696,51	704,97	1,2161	29	18	60 mn	37 mn	61,67%
3	90	90	324	29	704,72	713,06	1,1863	29	17	60 mn	35 mn	58,33%
4	80	80	286	29	525,53	531,33	1,1094	29	16	60 mn	35 mn	58,33%
5	60	60	200	29	248,54	251,22	1,0945	29	15	60 mn	34 mn	56,67%
6	50	50	173	29	318,33	321,74	1,0807	28	14	60 mn	32 mn	53,33%
7	20	20	74	29	158,21	159,79	1,0022	27	14	60 mn	31 mn	51,67%
8	15	15	59	29	421,12	425,28	0,9926	26	12	60 mn	30 mn	50%
9	10	10	31	29	215,14	217,04	0,9019	25	12	60 mn	28 mn	46,67%
10	9	9	34	29	368,13	371,36	0,8856	25	12	60 mn	27 mn	45%

TABLE 6.15 – Résultats sur des instances générées aléatoirement de type CHT.

À partir des résultats présentés dans les tableaux précédents, on peut constater que l'intégration des temps de pauses n'a pas une influence importante sur la qualité des solutions, vu que pour l'ensemble des instances testées, les gaps entre les solutions sans et avec intégration des temps de pauses, sont très faibles. D'après ces résultats, on peut également remarquer que l'intégration des temps de pauses permet de diminuer considérablement le nombre de ressources humaines et matérielles utilisées, ainsi que leur temps d'occupation et leur charge de travail sur les intervalles des temps de pauses. Ces résultats montrent que les méthodes d'ordonnancement développées, permettent d'une part de mieux organiser le travail quotidien des employés, et d'autre part de diminuer leur charge de travail quotidienne.

## 6.6 Métriques de similarité pour la stabilité des solutions

Dans le but de favoriser le bien-être au travail, des métriques de similarité ont été mises en place pour évaluer les similitudes entre les ordonnancements journaliers proposés. L'objectif étant d'assurer la stabilité au niveau des plannings et de l'organisation quotidienne du travail.

Dans le présent travail, une métrique de similarité permet de mesurer la similitude entre deux solutions par rapport au critère d'optimisation et dans la structure et la conception des solutions.

Il existe plusieurs mesures de similarité classées en quatre catégories selon la classification de la littérature (Sneath et al. [240], Wiggerts [241]) : (1) les coefficients de corrélation, (2) les mesures de distance, (3) les coefficients d'association, (4) les mesures de similarité probabiliste.

Dans cette étude nous nous focalisons particulièrement sur les coefficients de corrélation et la mesure de distance de Hamming [242], qui permet de quantifier la différence entre deux solutions comparées. Le choix de cette distance réside dans le fait qu'elle permet de connaître et d'avoir plus d'informations sur la structure des solutions et comment elles sont construites.

Dans ce travail, les mesures de similarité mises en place, sont basées sur le gap entre les fonctions objectives des solutions et sur quatre distances de Hamming :

- $d_1$  : distance permet de comparer les solutions en termes d'écart entre les fonctions objectives des solutions comparées.
- $d_2$  : distance évalue les différences dans le séquençement des opérations dans les vecteurs solutions, et leurs séquençements sur les machines.
- $d_3$  : distance compare les solutions par rapport aux différences dans l'affectation des opérations aux machines.
- $d_4$  : distance mesure les différences dans le traitement des lots des tâches. La comparaison entre les solutions est basée sur les dates de début et de fin de traitement des opérations des lots des tâches.
- $d_5$  : distance permet de quantifier les différences entre les solutions par rapport aux dates de début et de fin de traitement des tâches. Il est important de noter que si deux tâches ont la même date de début de traitement dans les solutions comparées, n'implique pas forcément qu'elles ont la même date de fin de traitement. Ceci dépend de la façon dont les lots sont traités dans les deux solutions.

Les formules mathématiques des mesures de similarité  $d_1$ ,  $d_2$ ,  $d_3$ ,  $d_4$  et  $d_5$  sont représentées dans la Table 6.16 :

Distance	Formule mathématique
Gap	$d_1 = \frac{ S_{obj}^2 - S_{obj}^1 }{T}$ , où $T$ est la taille des vecteurs solutions
Hamming	$d_2 = \frac{\sum_{p=1}^T X_p}{T}$ , $X = (X_1, \dots, X_p, \dots, X_T)$ $X_p = \begin{cases} 1, & \text{si l'opération située à la position } p \text{ est différente dans les solutions comparées} \\ 0, & \text{sinon} \end{cases}$
Hamming	$d_3 = \frac{\sum_{p=1}^T X_p}{T}$ , $X = (X_1, \dots, X_p, \dots, X_T)$ $X_p = \begin{cases} 1, & \text{si l'opération située à } p \text{ n'est pas affectée à la même machine dans les solutions} \\ 0, & \text{sinon} \end{cases}$
Hamming	$d_4 = \frac{\sum_{i=1}^n X_i}{n}$ , $X = (X_1, \dots, X_i, \dots, X_n)$ $X_i = \begin{cases} 1, & \text{si les lots de la tâche } i \text{ ne sont pas traités similairement dans les solutions comparées} \\ 0, & \text{sinon} \end{cases}$
Hamming	$d_5 = \frac{\sum_{i=1}^n X_i}{n}$ , $X = (X_1, \dots, X_i, \dots, X_n)$ $X_i = \begin{cases} 1, & \text{si la date de début ou de fin de traitement de la tâche } i \text{ est différente dans les solutions} \\ 0, & \text{sinon} \end{cases}$

TABLE 6.16 – Formules mathématiques des métriques de similarité.

Les figures ci-dessous présentent le déroulement des procédures de calcul des mesures de similarité à travers un exemple avec 3 tâches et 4 machines, où les tâches 1 et 3 sont composées chacune de 3 lots et 3 opérations et la tâche 2 est composée de 2 lots et 2 opérations. À partir de cet exemple, deux solutions sont considérées, qui diffèrent dans l'affectation des opérations et leur séquençement sur les machines, ainsi que dans la façon dont les lots des tâches sont traités dans les solutions comparées.

Dans la Figure 6.4 la distance  $d_1$  est calculée en évaluant le gap entre les fonctions objectives des deux solutions. La Figure 6.5 présente le déroulement du calcul de la distance  $d_2$  en comparant les vecteurs de solutions gène par gène. Si une opération donnée n'est pas située dans la même position  $p$  dans les deux solutions, dans ce cas  $X_p$  associé il est égal à 1. Dans l'exemple présenté dans la Figure 6.5, ces gènes correspondent à ceux situés dans les positions 9, 10, 14, 15, 18, 19, 20, 21, 22. Il est important de noter que la distance  $d_2$  permet de mesurer les différences dans le séquençement des opérations dans les vecteurs solutions, ainsi que leurs séquençements sur les machines. Les différences dans le séquençement des opérations sur les machines sont évaluées à l'aide de la fonction décodage des solutions en calculant les dates de début et de fin de traitement des opérations sur les machines. Le calcul de la distance  $d_3$  dans la Figure 6.6 permet de quantifier les différences entre les solutions dans l'affectation des opérations aux machines. En effet, si l'opération située à la position  $p$  dans la première solution est affectée à deux machines différentes dans les deux solutions, alors  $X_p$  correspondant il est égal à 1.

La Figure 6.7 illustre la procédure du déroulement de calcul de la distance  $d_4$ . Cette procédure parcourt les vecteurs solutions et les compare dans la façon du traitement des lots. Dans la Figure 6.7, les lots des tâches 2 et 3 sont traités similairement dans les deux solutions. Cependant les lots de la tâche 1 sont traités différemment. À titre d'exemple, les quadruples  $(1, 3, 1, 1)$  et  $(1, 1, 1, 1)$  sont situés côte à côte dans la deuxième solution, ceci signifie que les lots 1 et 3 de la tâche 1 sont traités en même temps sur la machine 1. Néanmoins, dans la première solution, ils sont traités consécutivement, i.e, le traitement de  $(1, 1, 1, 1)$  ne peut commencer qu'après l'achèvement de  $(1, 3, 1, 1)$ , et de même pour les quadruples  $(1, 1, 2, 3) \rightarrow (1, 3, 2, 3)$  et  $(1, 1, 3, 1) \rightarrow (1, 2, 3, 1)$ . Le calcul de la distance  $d_5$  présenté dans la Figure 6.8 s'effectue en évaluant les différences entre les solutions par rapport aux dates de début et de fin de traitement des tâches. Il est important de noter que si une tâche a la même date de début de traitement dans les solutions comparées, n'implique pas forcément qu'elle a la même date de fin de traitement. Ceci dépend de la façon du traitement des lots de cette tâche dans les deux solutions. Dans la Figure 6.8 les dates de fin de traitement de la tâche 1 sont différentes dans les solutions, en raison des différences dans la façon du traitement des lots, pourtant cette tâche a la même date de début de traitement dans la première et la deuxième solution.



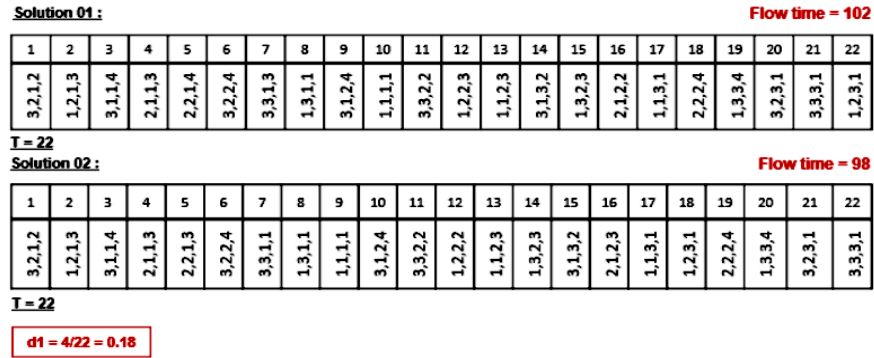


FIGURE 6.4 – Calcul de la distance  $d_1$ .

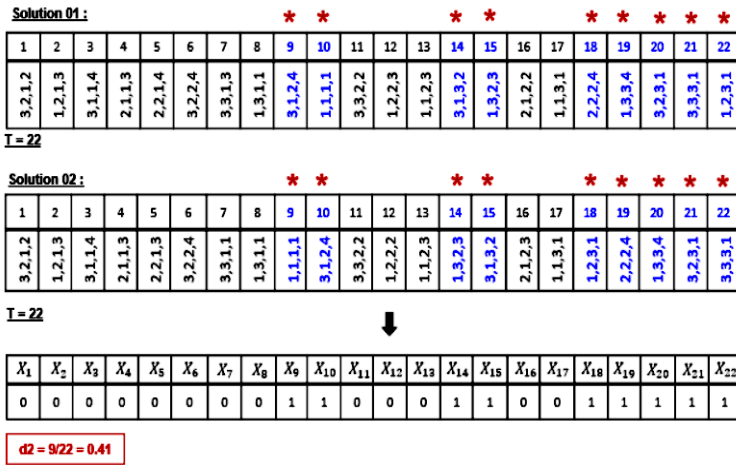


FIGURE 6.5 – Calcul de la distance  $d_2$ .

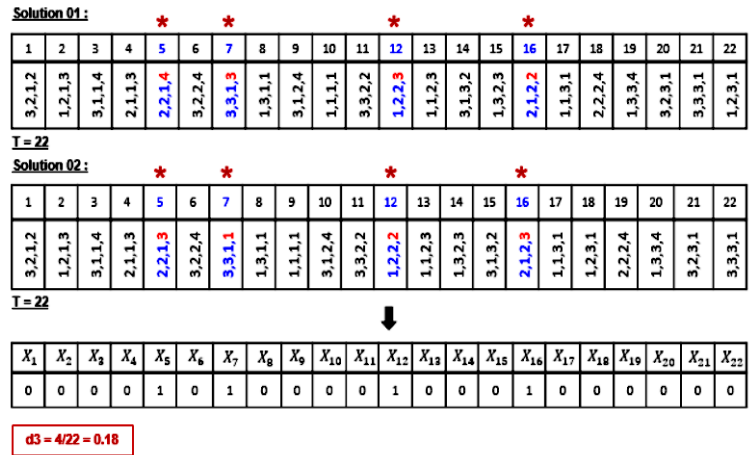


FIGURE 6.6 – Calcul de la distance  $d_3$ .

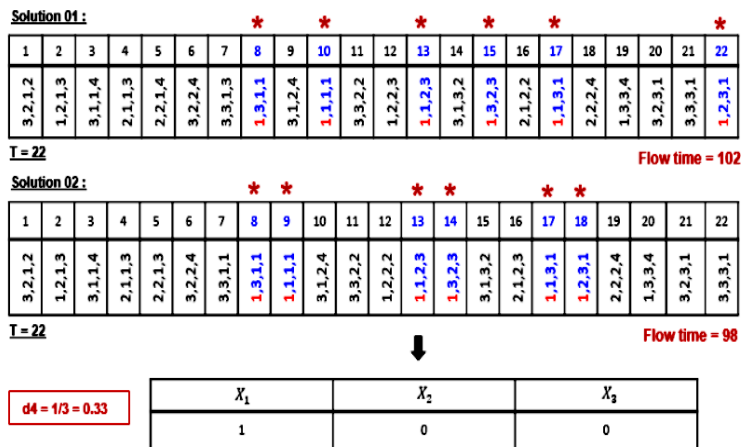


FIGURE 6.7 – Calcul de la distance  $d_4$ .

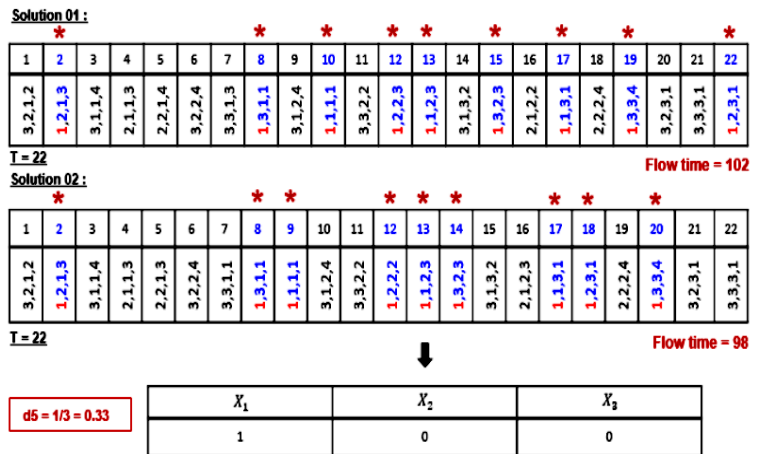


FIGURE 6.8 – Calcul de la distance  $d_5$ .

De plus, des métriques de similarité présentées précédemment, le coefficient de corrélation  $\rho(d_i, d_j)$  est aussi utilisé pour mesurer les similitudes entre les solutions. Le coefficient de corrélation permet d'évaluer la relation entre les distances  $d_i$  et  $d_j$ . En effet, lorsque  $\rho(d_i, d_j)$  est positif, cela signifie que  $d_i$  et  $d_j$  varient dans le même sens, et lorsqu'il est négatif, les distances varient dans le sens opposé. De plus, plus la valeur absolue du coefficient de corrélation est proche de 1, plus la relation entre les distances est forte. La Table 6.17 présente les résultats d'évaluation des différentes mesures de similarité présentées précédemment, sur des instances réelles du CHT de tailles différentes. Les coefficients de corrélation entre les distances sont présentés dans la Table 6.18.

Instance	$d_1$	$d_2$	$d_3$	$d_4$	$d_5$
3x12x11x6	0.0488	0.789	0.525	0.33	0.862
10x10x132x6	0.0382	0.945	0.594	0.440	0.959
20x20x146x8	0.0249	0.866	0.472	0.250	0.976
30x30x151x10	0.0573	0.762	0.538	0.160	0.835
50x50x191x14	0.0198	0.934	0.637	0.180	0.799
70x70x256x18	0.0731	0.878	0.663	0.220	0.874
80x80x300x20	0.0856	0.984	0.696	0.250	0.983

TABLE 6.17 – Évaluation des métriques de similarité sur des instances réelles de tailles différentes.

$\rho(d_1, d_2)$	$\rho(d_1, d_3)$	$\rho(d_1, d_4)$	$\rho(d_1, d_5)$	$\rho(d_2, d_3)$	$\rho(d_2, d_4)$	$\rho(d_2, d_5)$	$\rho(d_3, d_4)$	$\rho(d_3, d_5)$	$\rho(d_4, d_5)$
0.012966	0.006332	0.25564	0.239936	0.6844598	0.253425	0.4716043	0.11051	0.02050	0.51688

TABLE 6.18 – Coefficients de corrélation entre les distances de similarité présentées dans la Table 6.17.

D'après les résultats présentés dans les Tables 6.17 et 6.18, on peut conclure que les valeurs obtenues des coefficients de corrélation impliquent que les relations entre les distances sont faibles. Ces résultats montrent également que toutes les mesures de similarité apportent des informations importantes et elles sont complémentaires entre elles. Par exemple, la distance  $d_1$  apporte une information sur les écarts entre les solutions en termes de critère d'optimisation. Néanmoins, cette distance seule ne permet pas de connaître la structure des solutions, et elle n'apporte aucune information sur l'affectation et le séquençement des opérations, la façon dont les lots des tâches sont traités, ainsi que les dates de début et de fin de traitement des tâches, qui sont des informations apportées par les autres distances. En effet, une combinaison par addition des distances  $d_1, d_2, d_3, d_4$  et  $d_5$  (equation 6.1), permet d'obtenir une mesure de distance permettant de fournir toutes ces informations et de connaître plus la structure des solutions et la façon dont elles sont conçues.

$$d^* = d_1 + d_2 + d_3 + d_4 + d_5 \quad (6.1)$$

La mesure de similarité entre deux solutions  $X = (X_1, \dots, X_p, \dots, X_T)$  et  $Y = (Y_1, \dots, Y_p, \dots, Y_T)$ , est évaluée à l'aide de la distance  $d^*$ , en comparant  $d^*(X, Y)$  à un degré de similarité  $DS$  prédéfini. En effet, si  $d^*(X, Y) \geq DS$ , cela signifie que les différences entre les solutions  $X$  et  $Y$  sont importantes. Dans le cas contraire, les solutions  $X$  et  $Y$  sont similaires. Dans cette étude, le degré de similarité  $DS$  entre les solutions est défini à l'aide d'un plan d'expérience de Taguchi (voir chapitre 5), réalisé sur des instances de tailles différentes.

## 6.7 Conclusion

Dans ce chapitre nous avons présenté les résultats d'application des algorithmes d'ordonnancement développés sur un cas industriel réel. Les différentes phases d'application et de test de ces algorithmes sur le terrain ont été présentées, ainsi que la démarche de collecte et de traitement des données. De plus, afin de favoriser le bien-être au travail, des métriques de similarité ont été mises en place, pour assurer la stabilité au niveau de l'ordonnancement quotidien du travail. Les résultats obtenus ont prouvé l'efficacité et la fiabilité des algorithmes développés pour l'ordonnancement des opérations du processus de production alimentaire, et ont permis des améliorations importantes et significatives entre 10 % et 18 % de l'organisation actuelle et de la performance du système de production étudié. Ces résultats montrent également que les méthodes d'ordonnancement développées, permettent d'une part de mieux organiser le travail quotidien des employés et d'autre part de diminuer leur charge de travail quotidienne.

# Conclusion générale

Dans la gestion et l'organisation des hôpitaux, il reste encore beaucoup de progrès à accomplir pour améliorer la qualité des soins tout en réduisant les coûts. Pour répondre efficacement aux besoins des patients d'une part et pour améliorer les conditions de travail et le bien-être de leurs employés d'autre part, les hôpitaux cherchent des outils et de nouveaux moyens d'organisation et de gestion. Les établissements de soins découvrent l'importance de la démarche logistique pour une gestion efficace de l'ensemble des activités comme dans d'autres organisations des systèmes industriels. La logistique hospitalière s'inscrit dans une dynamique de recherche de la performance globale où les activités sont organisées et structurées dans le but de satisfaire les patients et les employés dans leurs milieux de travail. Pour cela, il est nécessaire d'améliorer le fonctionnement des établissements et mettre en place de vrais outils de gestion et de management. L'amélioration des conditions de travail des employés et la recherche du bien-être au travail dans le domaine public ne se réduit pas au domaine de la prévention de santé et de sécurité au travail, mais elle doit être considérée comme une composante de la performance globale. Les organisations publiques ont pris conscience de la nécessité de s'interroger sur ce sujet par le biais d'un management approprié. Accompagner les agents, les aider à évoluer dans leurs pratiques, mieux gérer leurs émotions et développer des logiques coopératives transversales sont autant de clés pour éviter que l'urgence et les problèmes du quotidien ne s'imposent au détriment d'une logique plus solidaire. À l'appui des études et de leurs analyses critiques, des chercheurs et des praticiens issus des fonctions publiques décortiquent les notions de bien-être et de bienveillance au travail, dans le but d'atteindre un fonctionnement optimisé favorisant l'innovation et l'engagement de chacun au profit de tous.

Ce travail a abordé une problématique au centre des préoccupations actuelles des hôpitaux portant sur l'optimisation et l'amélioration de la gestion des activités de la chaîne logistique hospitalière. Un contexte visant à la fois à assurer une meilleure qualité de service aux patients, à améliorer les conditions de travail et le bien-être des employés, à mieux gérer les coûts et également à rationaliser les dépenses conduit inévitablement à une réorganisation des fonctions de la chaîne logistique hospitalière. En effet, le secteur de la santé a suivi la même évolution que toute autre industrie en matière de logistique, en adaptant des concepts, des méthodes et des outils intégrant la spécificité de leurs produits. Il est en ce sens confronté aux mêmes problématiques. Pour offrir un service accessible et de qualité à la population malgré des ressources limitées, les gestionnaires des établissements de santé doivent adopter des pratiques de gestion efficaces et cohérentes. La réorganisation des flux

de produits vis-à-vis des besoins des services, constitue un enjeu pour la sécurité des patients et un levier de contrôle financier dans le cadre de la maîtrise de leur stockage et de leur péremption.

Dans ce contexte s'inscrit la présente étude, qui a été motivée par une problématique réelle d'optimisation de la chaîne logistique du centre hospitalier de Troyes. Le centre hospitalier de Troyes cherche actuellement à revoir et à améliorer ses processus logistiques. Dans ce cadre, l'implémentation des techniques et des méthodes de la recherche opérationnelle doit permettre d'apporter des solutions améliorant l'efficacité des activités logistiques. Nos travaux de recherche sont orientés spécifiquement sur les problèmes de planification et d'ordonnancement de la production alimentaire avec un accent mis sur l'amélioration des conditions de travail et le bien-être des employés. L'objectif consiste à développer des méthodes exactes et approchées pour résoudre ces différents problèmes.

Dans le chapitre 1, nous avons présenté le Centre Hospitalier de Troyes et les Hôpitaux Champagne Sud. Nous avons posé les problématiques étudiées, en introduisant à cet effet le contexte hospitalier, les problèmes constatés dans le cadre d'une démarche visant à la fois l'amélioration des conditions de travail et le bien-être des employés du service de restauration, ainsi que l'optimisation et la réorganisation de la logistique des flux alimentaires. Par la suite, nous avons présenté la démarche et la méthodologie de recherche que nous avons suivie pour traiter ces problèmes. Les dernières sections de ce chapitre ont été consacrées à la présentation de l'unité centrale de production alimentaire, le service de restauration, ainsi que le système organisationnel permettant la production des repas.

Le chapitre 2 a été consacré à une étude bibliographique sur les différents sujets abordés dans cette thèse. Dans un premier temps, l'accent a été mis sur l'importance du facteur humain dans les systèmes de production et logistiques et sur une présentation d'un état de l'art sur les approches de modélisation et de résolution utilisées dans la littérature pour la conception des systèmes de production et logistiques intégrant des aspects humains. Ensuite, une étude bibliographique sur les problèmes de planification et d'ordonnancement des processus de production alimentaire et les méthodes de résolutions développées dans la littérature, ont été présentées. La dernière partie de ce chapitre a été consacrée à un état de l'art sur les problèmes job-shop flexible, les modèles mathématiques, ainsi que les schémas de codage proposés dans la littérature pour ce type de problèmes.

Dans le chapitre 3, nous nous sommes focalisés particulièrement sur la description du problème étudié avec ses différentes contraintes et le critère d'optimisation visé dans cette étude. Nous avons proposé un nouveau modèle mathématique développé dans le cadre de cette thèse permettant de résoudre le problème FJSP avec setups séquence-dépendants et fractionnement des tâches en lots, en intégrant des contraintes industrielles. Une étude sur le modèle développé et les résultats de mise en œuvre sur différents types d'instances, ont été présentés et discutés. Les résultats d'implémentation du modèle mathématique, ont confirmé son efficacité pour la résolution des instances de petites tailles du problème étudié. Ces résultats ont montré également les limites d'une résolution exacte pour le problème traité. Les résultats de cette étude ont permis d'apporter de nouvelles contributions et ont fait l'objet des publications scientifiques.

---

Le chapitre 4 a été consacré sur le fonctionnement et la description de l'architecture des métaheuristiques développées pour le problème FJSP-SDST-JS-MTMR. Ces approches de résolution sont des méthodes basées sur des algorithmes génétiques et des algorithmes de recherche locales itératives combinées avec des recherches locales et des heuristiques pour la génération des solutions initiales. Les différents étapes et éléments des métaheuristiques hybrides développées ont été décrits et expliqués à travers des exemples illustratifs.

Dans le chapitre 5, nous nous sommes intéressés par la présentation et discussion des résultats expérimentaux d'implémentation des métaheuristiques hybrides développées pour résoudre le problème FJSP-SDST-JS-MTMR, qui ont été présentées dans le chapitre 4. L'étude expérimentale a été effectuée sur des instances réelles et théoriques de différentes tailles. Les résultats expérimentaux de cette étude ont démontré l'efficacité et la performance des méthodes de résolution développées dans cette étude pour le problème traité. Ces résultats ont fait l'objet des publications scientifiques dans des conférences et de revue internationales.

Enfin, dans le chapitre 6, nous avons présenté la démarche de recueil des données sur terrain et les résultats d'application et de test des métaheuristiques développées sur des journées réelles de production. Ces résultats ont permis de valider en contexte réel la contribution de cette thèse et les travaux théoriques menés en amont. Par la suite, les résultats d'une étude sur l'impact d'intégration des temps de pause ont été présentés et discutés. Dans la dernière section de ce chapitre, des métriques de similarité mises en place dans cette étude, ont été présentées. L'objectif étant d'assurer la stabilité au niveau de l'organisation quotidienne du travail. Les résultats d'application et de test sur terrain, ont prouvé l'efficacité et la fiabilité des algorithmes développés pour l'ordonnancement des processus de production alimentaire, et ont apporté des améliorations importantes et significatives de l'organisation actuelle et de la performance du système étudié. Ces résultats montrent également que les méthodes d'ordonnancement développées, permettent d'une part de mieux organiser le travail quotidien des employés et d'autre part de diminuer leur charge de travail quotidienne.

Suite à la présentation des différents travaux réalisés tout au long de cette thèse, plusieurs pistes et perspectives intéressantes peuvent être envisagées dans de futures recherches. Le présent travail est limité par le nombre de ressources humaines disponibles sur les postes de travail et ne prend pas en compte les aléas possibles, tels que l'absence du personnel, les pannes de machines et l'indisponibilité des matières premières. Des recherches ultérieures peuvent être étendues en tenant compte de ces nouvelles contraintes. Une perspective importante peut être dégagée visant la fiabilisation des données et la création d'une base de données au sein du service de restauration permettant de gérer les données concernant la préparation des repas. Les métriques de similarité mises en place dans cette étude pour assurer la stabilité de l'ordonnancement quotidien du travail peuvent être utilisées dans de futurs travaux dans le but de favoriser l'acceptation du changement d'organisation du travail. En effet, ces mesures de similarité permettent d'évaluer les similitudes entre les solutions proposées par les algorithmes développés et l'organisation réelle de la production, ceci permet de réajuster les ordonnancements proposés et de réduire ainsi les différences importantes

entre l'ordonnancement réel et celui proposé par les algorithmes. Quant à la résolution du problème étudié, l'exploitation d'autres méthodes de résolution offre des perspectives intéressantes, telles que l'application de nouvelles heuristiques et métaheuristiques et le développement d'autres méthodes exactes tel que la méthode de séparation et évaluation. Ceci permet de tester l'efficacité des métaheuristiques développées sur des instances de grandes tailles du problème ou même les résoudre à l'optimalité. Le présent travail ouvre également la voie à d'autres perspectives, comme l'étude du problème de planification de la production alimentaire sur la semaine avec l'objectif d'équilibrage et le lissage de la charge de travail sur les journées, et le développement des modèles mathématiques et des méthodes d'optimisation pour résoudre ce nouveau problème. Nous pouvons ainsi envisager une autre perspective ambitieuse visant à développer des modèles mathématique et des méthodes d'optimisation pour l'ordonnancement et la planification de la production alimentaire, intégrant des facteurs humains tels que : la réduction de la charge de travail, la fatigue, le stress et les risques ergonomiques, etc. Enfin, une dernière perspective envisageable consiste à étudier la chaîne logistique alimentaire aval, ou la globalité de la chaîne amont et aval, intégrant l'ordonnancement et la planification de la production, la gestion des stocks et l'optimisation des tournées de livraison. Le développement des modèles mathématiques et des méthodes pour l'optimisation de la chaîne logistique alimentaire étendue, prenant compte des facteurs et des aspects humains, est une perspective d'avenir qui nécessite de stimuler la réflexion dans de futures recherches.







# Annexes

## A.1 Sondages sur le bien-être au travail

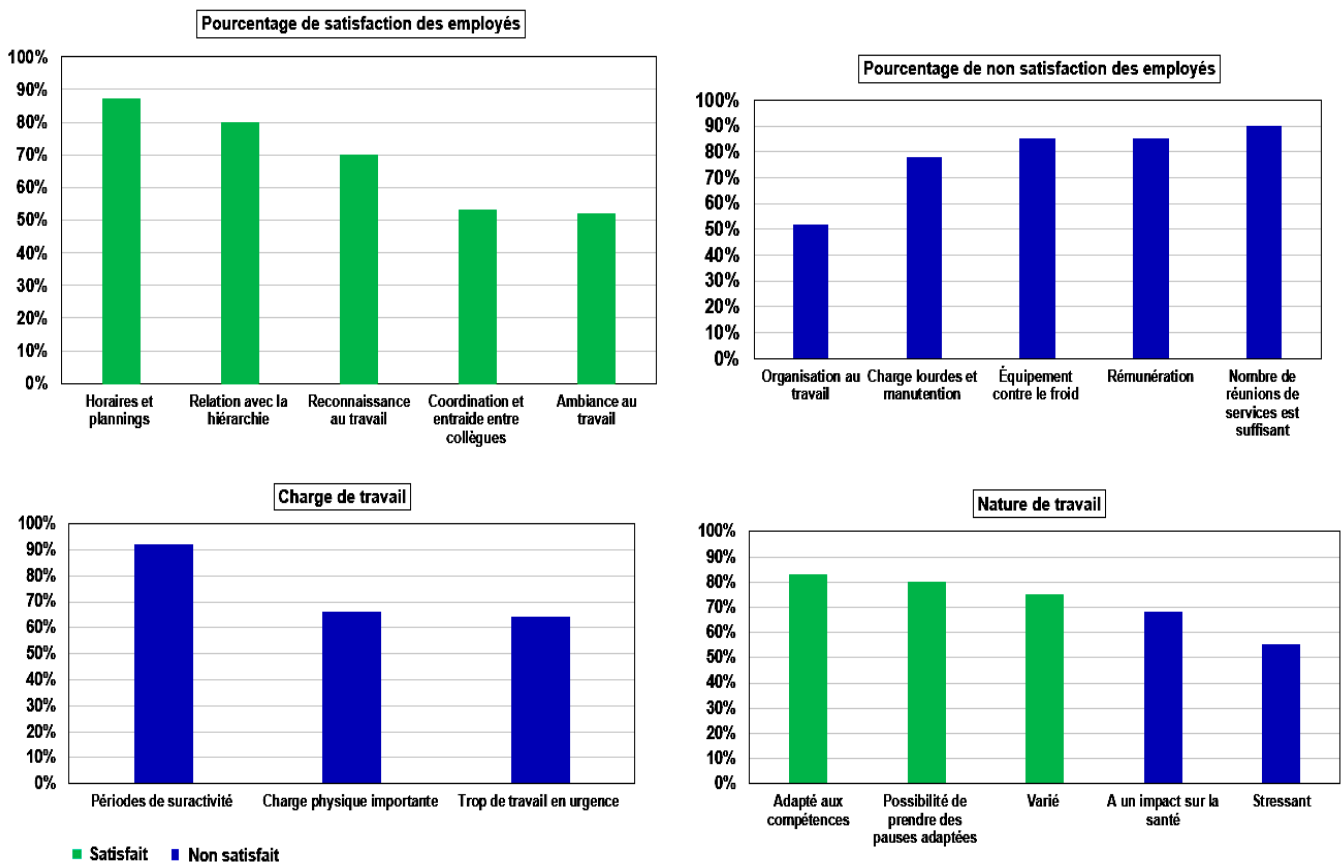


FIGURE A. 9 – Synthèse des résultats des sondages du bien-être au travail.





### A.3 Organigramme de l'UCPA

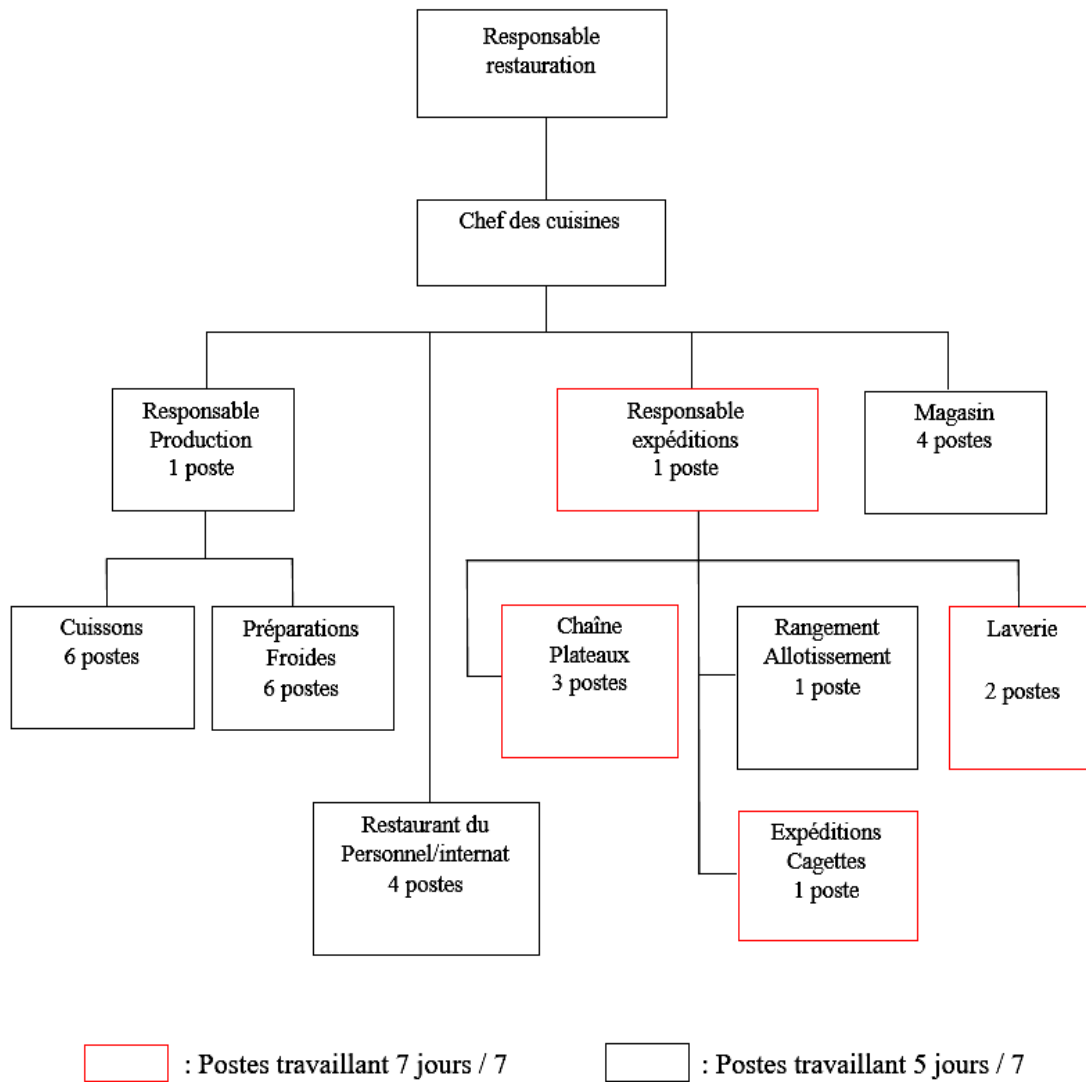


FIGURE A. 12 – Organigrammes fonctionnels de l'UCPA.

## A.4 Organisation du service de restauration

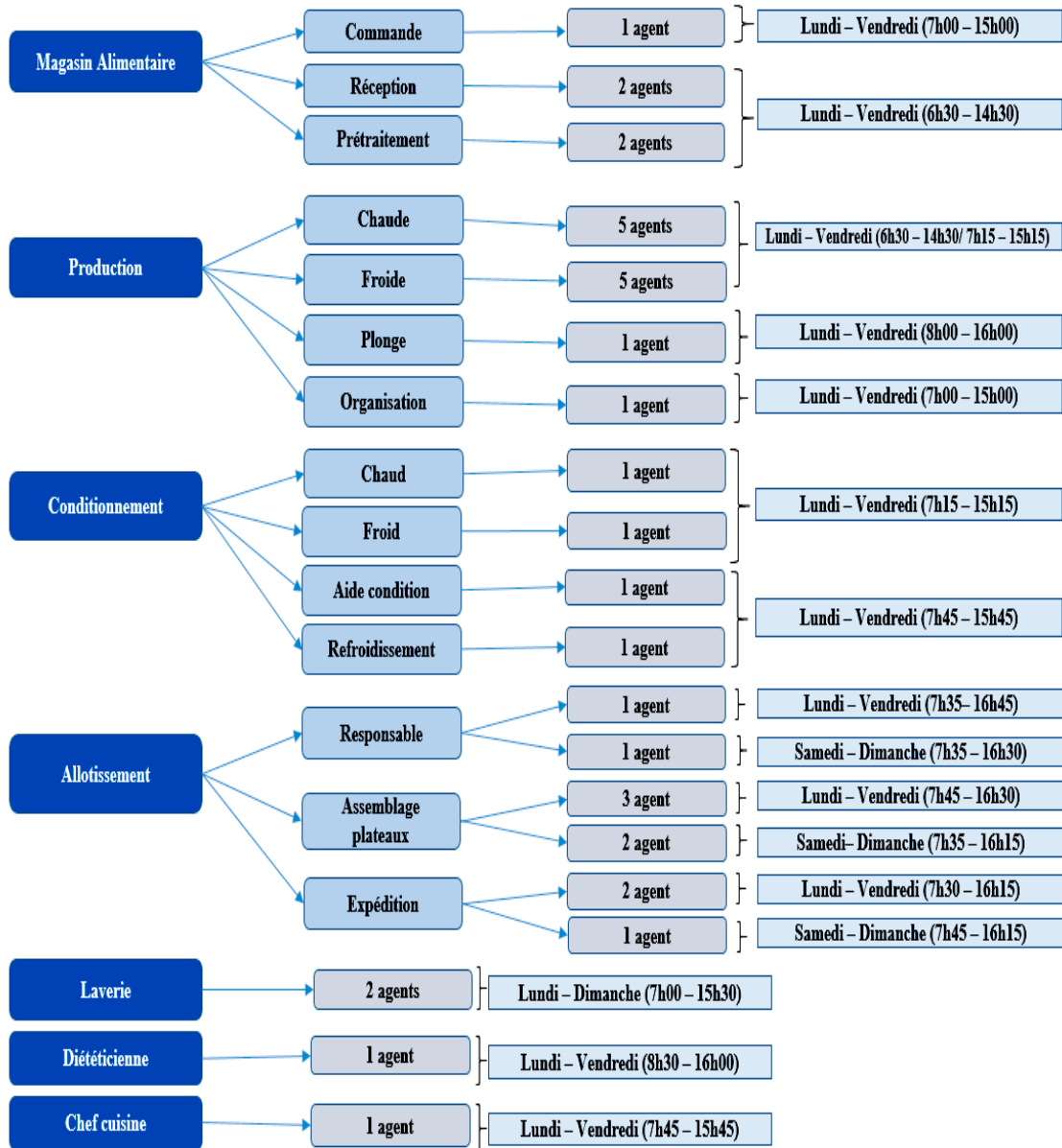


FIGURE A. 13 – Organisation du service de restauration.





## A.5 Schéma directeur de fonctionnement

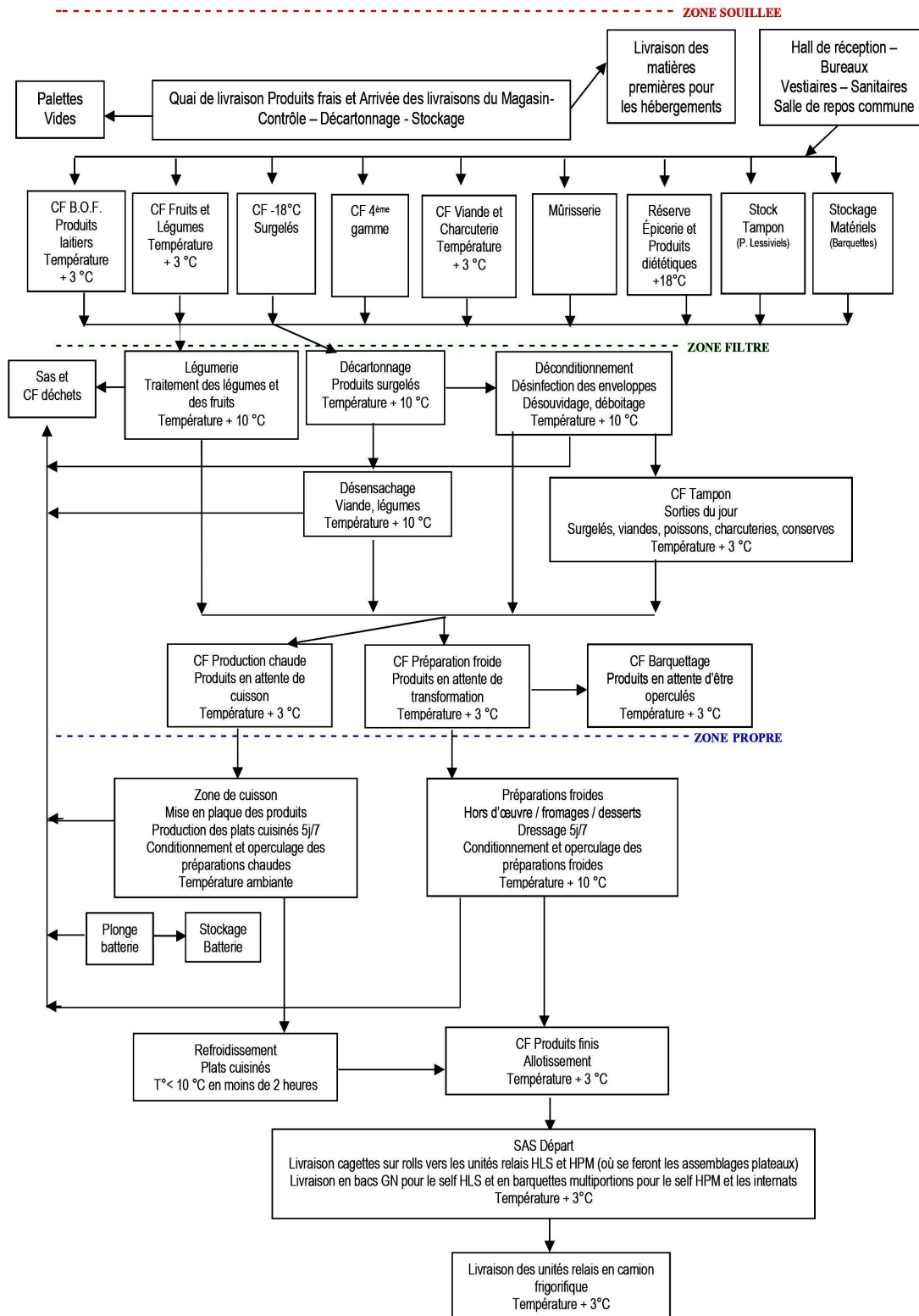


FIGURE A. 14 – Synoptique de fonctionnement de l’UCPA.



## A.6 Processus de prise de décisions pour la production des repas

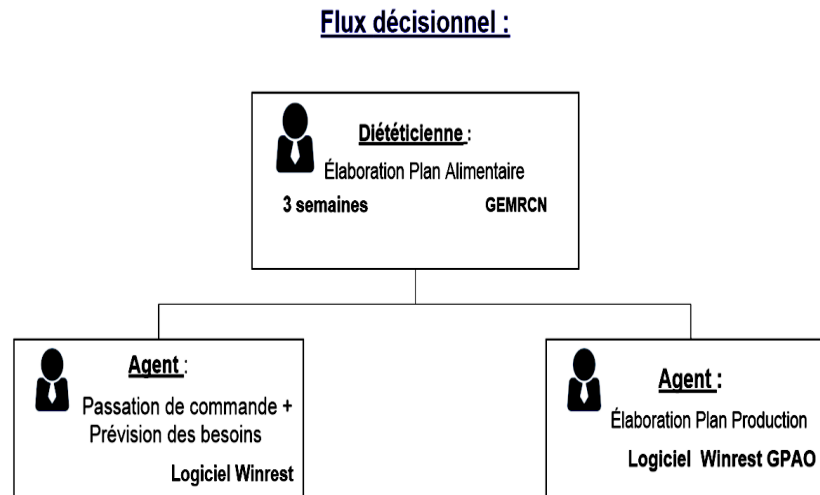


FIGURE A. 15 – Flux de prise de décision pour la fabrication des repas.

## A.7 Exemple de plan alimentaire

	Mardi	Mercredi	Jeudi	Vendredi	Samedi	Dimanche	Lundi
<b>Midi</b>	Cruautés	Pâtisserie salée	Cruautés	Cruautés	Cruautés	Poisson	Cruautés
	Abats	Volaile	Viande blanche	Poisson	Viande rouge	Viande rouge	Viande blanche
	Féculents	Légumes verts	Légumes verts	Féculents	Légumes verts	Légumes verts	Féculents
	Fromage	Fromage	Laitage	Fromage	Laitage	Fromage	Fromage
	Fruit cuit	Fruit cru	Fruit cru	Entremets	Fruit cru	Pâtisserie	Fruit cuit
<b>Soir</b>	Potage	Potage	Potage	Potage	Potage	Potage	Potage
	Poisson	Plat à base protidique & Féculents	Viande rouge & féculents	Charcuterie	Volaile & féculents	Plat à base protidique & Féculents	Préparation pâtissière salée
	Légumes verts	Fromage	Fromage	Légumes verts	Fromage	Fromage	Légumes verts
	Entremets	Fruit cuit	Entremet	Fruit cru	Entremets	Fruit cru	Fruit cru

FIGURE A. 16 – Exemple de plan alimentaire saison hiver semaine 1.

## A.8 Exemple de plan de menu

	Mardi	Mercredi	Jeudi	Vendredi	Samedi	Dimanche	Lundi	
<b>Midi</b>	Concombres à la crème	Friand au fromage	Betteraves vinaigrette	Salade verte	Carottes râpées	Sardines à l'huile	Céleri rémoulade	Bienne: Rôti de porc
	Foie de bœuf aux échalotes	Cuisse de poulet	Palette à la diable	Poisson à la Dugléré	Estouffade de bœuf	Navarin d'agneau	Sauté de porc	
	Risotto	Courgettes	Choux de Bruxelles	Pommes vapeur	Choux-fleurs braisés	Jeunes carottes	Petits pois	Hauts-Cbs/Bienne: Viande hachée aux aromates
	Bonbel	Camembert	Yaourt nature	Emmental	Fromage blanc	Saint-Nectaire	Crème de gruyère	
	Purée de pêches	Fruit	Fruit	Crème vanille	Fruit	Tarte normande	Purée de pommes	
<b>Soir</b>	Potage	Potage	Potage	Potage	Potage	Potage	Potage	OMS/NZ: Bonbel
	Poisson pané	Lasagnes	Tomate farcie + riz	Roulades	Pommes rôties à la vdaleille	Pâtes au jambon	Tarte aux poireaux	
	Ratatouille s/féculents	Demi-sel	Saint-Paulin	Brunoise provençale	Tomme de montagne	Fromage ail et fines herbes	Haricots beurre	
	Crème caramel	Purée pommes-fraises	Suisse fruité	Fruit	Flan nappé caramel	Fruit	Fruit	

FIGURE A. 17 – Exemple de plan de menu saison hiver semaine 1 (menu normal).

	Mardi	Mercredi	Jeudi	Vendredi	Samedi	Dimanche	Lundi		
<b>Midi</b>	Concombres à la crème	Tarte aux 3 fromages	Betteraves vinaigrette	Salade verte	Carottes râpées	Sardines à l'huile	Céleri rémoulade	Bienne: Rôti de porc	
	Foie de bœuf aux échalotes	Sauté de dinde	Palette à la diable	Poisson à la Dugléré	Viande hachée aux aromates	Estouffade de bœuf	Cuisse de poulet		
	Risotto	Côtes de bettes persillées	Chou vert braisé	Pommes vapeur	Courgettes	Jeunes carottes	Purée Saint-garnain	OMS/NZ/Pasteur: Moules	
	Bonbel	Camembert	Yaourt nature	Emmental	Fromage blanc	Saint-Nectaire	Crème de gruyère	OMS/NZ/Pasteur: Frites	
	Cocktail de poires	Fruit	Fruit	Crème chocolat	Fruit	Tarte normande	Purée Pommes-pruneaux		
<b>Soir</b>	Potage	Potage	Potage	Potage	Potage	Potage	Potage	Hauts-Cbs: Tarte aux 3 fromages	
	Poisson citronné	Lasagnes	Tomate farcie + riz	Quiche lorraine	Pommes rôties à la vdaleille	Pâtes au jambon	Croque-Monsieur		OMS/NZ: Bonbel
	Ratatouille s/féculents	Demi-sel	Saint-Paulin	Poêlée méridionale	Tomme de montagne	Fromage ail et fines herbes	Haricots beurre		OMS/NZ/Pasteur: Tête de veau
	Crème vanille	Purée de pommes	Mousse au chocolat	Fruit	Flan nappé caramel	Fruit	Fruit		OMS/NZ/Pasteur: Pommes vapeur

Semaine n°1-4

Menu normal

FIGURE A. 18 – Exemple de plan de menu saison hiver semaine 1-4 (menu normal).

NORMAL	SALE	UNIQUE
<b>DEJEUNER</b>	<b>Mardi</b>	<b>DINER</b>
CONCOMBRES A CREME (HO) FOIE DE BOEUF ECHALOTE RISOTTO BONBEL PUREE PECHE S/SUCRE		POTAGE POISSON PANE RATATOUILLE S/FEC XPL CREME DESSERT CARAMEL
<b>DEJEUNER</b>	<b>Mercredi</b>	<b>DINER</b>
FRIAND AU FROMAGE CUISE DE POULET ROTI COURGETTES SAUTEES CAMEMBERT FRUIT		POTAGE LASAGNES DEMI SEL PUREE POM/FRAISE S/SUCRE
<b>DEJEUNER</b>	<b>Jeudi</b>	<b>DINER</b>
BETTERAVES VINAIGRETTE (HO) PALETTE DE PORC A LA DIABLE CHOUX DE BRUXELLES YAOURT NATURE FRUIT		POTAGE TOMATE FARCIE SUR RIZ SAINT PAULIN MOUSSE CHOCO NOIR
<b>DEJEUNER</b>	<b>Vendredi</b>	<b>DINER</b>
SALADE VERTE VGTTE (HO) POISSON DUGLERE POMMES VAPEUR EMMENTAL CREME DESSERT VANILLE		POTAGE ROULADES AUX OLIVES BRUNOISE PROVENCALE XPL FRUIT
<b>DEJEUNER</b>	<b>Samedi</b>	<b>DINER</b>
CAROTTES RAPEES VGT VIANDE HACHEE AUX AROMATES CHOUX FLEURS BRAISES (GAR) FROMAGE BLANC FRUIT		POTAGE SALADE VERTE (garniture) POMMES ROTIES à la VOLAILLE XPL FLAN NAPPE CARAMEL
<b>DEJEUNER</b>	<b>Dimanche</b>	<b>DINER</b>
SARDINES NAVARIN JEUNES CAROTTES SAINT NECTAIRE TARTE NORMANDE		POTAGE PATES AU JAMBON FROMAGE AIL ET FINES HERBES FRUIT
<b>DEJEUNER</b>	<b>Lundi</b>	<b>DINER</b>
CELERI REMOULADE SAUTE DE PORC PETITS POIS CREME DE GRUYERE PUREE POMME S/SUCRE		POTAGE TARTE AUX POIREAUX (120G) H. BEURRE XPL FRUIT

FIGURE A. 19 – Exemple d’une semaine de menus avec profil alimentaire.

### A.9 Exemple de fiche technique

Jour de consommation

Dénomination du plat

Jour de production

Bon d'économat avec date de sortie des denrées

Divers indications sur les portions à respecter, les programmes à appliquer, les points d'une recette.

Barquettes à utiliser et quantités à produire

mardi midi

GIGOT PRINTANIER		TOUTES	
FABRICATION EN	C		
CONSOMMATION EN	I		
Nombre total de packs à préparer			
		K	PS
Code	Ingrédient	U.U.	Total
3103	TRANCHE DE GIGOT SURGELE	PIECE	72,000 72,000
3103	NAVETS EN CUBES CONGELES	KG	0,7200 0,7200
3103	JEUNES CAROTTES ENTIERES SURGEELES	KG	0,7200 0,7200
3103	PETITS POIS FINS SURGELE	KG	0,7200 0,7200
3103	EAU	LITRE	5,0400 5,0400
3103	JUS D'AGNEAU HYPOSODE	KG	0,1872 0,1872
3103	POUDRE DE TOMATE	KG	0,1260 0,1260
3103	AIL DESHYDRATE EN SEMOULE	KG	0,0360 0,0360
3103	HERBES DE PROVENCE	KG	0,0360 0,0360
3103	SEL FIN	KG	0,0072 0,0072
3103	POIVRE GRIS MOULU	KG	0,0007 0,0007

TRACABILITE PRODUCTION

Code	Quantité	Unité	Lot	Exp. Validité	Exp. Réception	Exp. Réception	Exp. Réception

RECYTTE

Programme cuisson: GIGOT.PRINTA  
Plaquer les tranches de gigot en plaque GN1/1.  
Cuire les légumes à part, les ajouter sur la viande lors du dressage en barquette.

GN 1/4 Self: 8x4  
GN 1/4 Intermat: 10x4

MINIBEST - direction de production PS

FIGURE A. 20 – Exemple de fiche technique (fiche suiveuse).

## A.10 Prestation alimentaire pour le restaurant du personnel

Midi	Nombre minimum au choix	Contenu
<b>Hors d'œuvre</b>	6 à 7 hors d'œuvres (dont 3 constants : salade verte, œuf dur et pomelos selon la saison) 1 entrée chaude	L'équilibre en termes de variété doit être : crudité, salade verte de saison, œuf ou poisson, cuitité...
<b>Plat protidique</b>	6 plats protidiques : 1 viande, 1 poisson, 4 constants (jambon, poulet, steak haché et viande froide ou poisson froid)	2 plats protidiques du jour au choix dont 1 proposé au patient. Ces plats reposent sur des modes de cuisson différenciés, tels que : 1 cuisson pauvre en matière grasse (grillade, rôti, vapeur, braisage) 1 cuisson plus riche en matière grasse (sauté, friture, charcuterie)
<b>Garniture</b>	4 garnitures : 1 légume vert, 1 féculent, 1 légume vert nature, 1 frite	2 garnitures du jour au choix dont 1 proposée au patient. 1 légume et 1 féculent sont proposés systématiquement au self
<b>Fromage</b>	2 fromages à la coupe	Choix proposés parmi une gamme de fromages
<b>Laitages - Dessert</b>	3 laitages (fromage blanc, yaourt, entremets, semoule au lait,...) 3 desserts (compote, pâtisserie, salade de fruits,...), fruits divers	1 pâtisserie au moins une fois par semaine. 1 corbeille de fruits de saison. 1 yaourt nature, 1 fromage blanc, 1 compote de pommes sont systématiquement proposés. Les entremets, les semoules au lait, les riz au lait et les salades de fruits sont des produits maison
<b>Boisson</b>	2	Les boissons comprennent des eaux de source et des eaux gazeuses de 50 cl. De l'eau d'adduction publique est à la disposition des usagers au moyen de fontaines réfrigérées au Self
<b>Assaisonnement en libre-service</b>	6	Sauce vinaigrette, mayonnaise Stick de ketchup, moutarde Sachets de sel, poivre
<b>Pain</b>	1	Pain blanc individuel

TABLE A. 19 – Prestation alimentaire proposée pour le restaurant du Self.

## A.11 Exemples de plannings de production des repas

Jour de Consommation	Lundi	Mardi	Mercredi	Jeudi	Vendredi	Samedi	Dimanche
▪ POTAGE	VENDREDI	LUNDI	LUNDI	LUNDI	JEUDI	JEUDI	JEUDI
▪ ENTREE NORMALE	VENDREDI	LUNDI	LUNDI	MARDI	MERCREDI	MERCREDI	JEUDI
▪ ENTREE FRAGILE	SAMEDI	LUNDI	LUNDI	MARDI	MERCREDI	JEUDI	VENDREDI
▪ ENTREE TRES FRAG	DIMANCHE	LUNDI	MARDI	MERCREDI	JEUDI	VENDREDI	SAMEDI
▪ COURANT ENTREE	VENDREDI	LUNDI	LUNDI	LUNDI	MERCREDI	MERCREDI	VENDREDI
▪ CC ENTREE	DIMANCHE	LUNDI	MARDI	MERCREDI	JEUDI	VENDREDI	SAMEDI
▪ VDE POISSON ŒUF	VENDREDI	LUNDI	LUNDI	MARDI	MERCREDI	MERCREDI	JEUDI
▪ VIANDE FRAGILE	SAMEDI	LUNDI	LUNDI	MARDI	MERCREDI	JEUDI	VENDREDI
▪ VIANDE TRES FRAGI	DIMANCHE	LUNDI	MARDI	MERCREDI	JEUDI	VENDREDI	SAMEDI
▪ PL FROID TR FRAG	DIMANCHE	LUNDI	MARDI	MERCREDI	JEUDI	VENDREDI	SAMEDI
▪ PLAT FROID FRAGIL	SAMEDI	LUNDI	LUNDI	MARDI	MERCREDI	JEUDI	VENDREDI
▪ PLAT FROID	VENDREDI	LUNDI	LUNDI	MARDI	MERCREDI	MERCREDI	JEUDI
▪ PLA CH ASS FROID	VENDREDI	LUNDI	LUNDI	MARDI	MERCREDI	MERCREDI	JEUDI
▪ PL CH AS FROID FR	DIMANCHE	LUNDI	MARDI	MERCREDI	JEUDI	VENDREDI	SAMEDI
▪ COURANT VIANDE	VENDREDI	LUNDI	LUNDI	LUNDI	MERCREDI	MERCREDI	VENDREDI
▪ GARNITURE	VENDREDI	LUNDI	LUNDI	MARDI	MERCREDI	MERCREDI	JEUDI
▪ GARNITURE FRAGIL	SAMEDI	LUNDI	LUNDI	MARDI	MERCREDI	JEUDI	VENDREDI
▪ GARNITURE FROIDE	VENDREDI	LUNDI	LUNDI	MARDI	MERCREDI	MERCREDI	JEUDI
▪ GARNITURE FROIDE FR	SAMEDI	LUNDI	LUNDI	MARDI	MERCREDI	JEUDI	VENDREDI
▪ GARN CH ASS FROID	VENDREDI	LUNDI	LUNDI	MARDI	MERCREDI	MERCREDI	JEUDI
▪ COURANT GARNITUR	VENDREDI	LUNDI	LUNDI	LUNDI	MERCREDI	MERCREDI	VENDREDI
▪ PATES	VENDREDI	LUNDI	LUNDI	LUNDI	MERCREDI	MERCREDI	VENDREDI
▪ DESSERT NORMALE	VENDREDI	LUNDI	LUNDI	MARDI	MERCREDI	MERCREDI	JEUDI
▪ DESSERT FRAGILE	SAMEDI	LUNDI	LUNDI	MARDI	MERCREDI	JEUDI	VENDREDI
▪ COURANT DESSERT	VENDREDI	LUNDI	LUNDI	LUNDI	MERCREDI	MERCREDI	VENDREDI
▪ CC PROD LAITIER	DIMANCHE	LUNDI	MARDI	MERCREDI	JEUDI	VENDREDI	SAMEDI
▪ CC EPICERIE	DIMANCHE	LUNDI	MARDI	MERCREDI	JEUDI	VENDREDI	SAMEDI
▪ CC FRUIT	DIMANCHE	LUNDI	MARDI	MERCREDI	JEUDI	VENDREDI	SAMEDI
▪ ENT DESS TR FRAGI	DIMANCHE	LUNDI	MARDI	MERCREDI	JEUDI	VENDREDI	SAMEDI
▪ COM COLL EPICERIE	...?...	...?...	...?...	...?...	...?...	...?...	...?...
▪ CC SURGELE	...?...	...?...	...?...	...?...	...?...	...?...	...?...
▪ CC SELF INTERNAT	...?...	...?...	...?...	...?...	...?...	...?...	...?...
▪ COURANT ROTI DIND	...?...	...?...	...?...	MARDI	MARDI	...?...	...?...

FIGURE A. 21 – Exemple de planning d’une journée de production pour la fabrication des repas de midi.

Jour de Consommation	Lundi	Mardi	Mercredi	Jeudi	Vendredi	Samedi	Dimanche
▪ POTAGE	VENDREDI	LUNDI	LUNDI	LUNDI	JEUDI	JEUDI	JEUDI
▪ ENTREE NORMALE	VENDREDI	LUNDI	MARDI	MARDI	MERCREDI	JEUDI	JEUDI
▪ ENTREE FRAGILE	SAMEDI	LUNDI	MARDI	MARDI	MERCREDI	JEUDI	VENDREDI
▪ ENTREE TRES FRAG	...?...	...?...	...?...	...?...	...?...	...?...	...?...
▪ COURANT ENTREE	VENDREDI	LUNDI	LUNDI	LUNDI	MERCREDI	MERCREDI	VENDREDI
▪ CC ENTREE	DIMANCHE	LUNDI	MARDI	MERCREDI	JEUDI	VENDREDI	SAMEDI
▪ VDE POISSON ŒUF	VENDREDI	LUNDI	MARDI	MARDI	MERCREDI	JEUDI	JEUDI
▪ VIANDE FRAGILE	SAMEDI	LUNDI	MARDI	MARDI	MERCREDI	JEUDI	VENDREDI
▪ VIANDE TRES FRAGI	DIMANCHE	LUNDI	MARDI	MERCREDI	JEUDI	VENDREDI	SAMEDI
▪ PL FROID TR FRAG	DIMANCHE	LUNDI	MARDI	MERCREDI	JEUDI	VENDREDI	SAMEDI
▪ PLAT FROID FRAGIL	SAMEDI	LUNDI	MARDI	MARDI	MERCREDI	JEUDI	VENDREDI
▪ PLAT FROID	VENDREDI	LUNDI	MARDI	MARDI	MERCREDI	JEUDI	JEUDI
▪ PLA CH ASS FROID	VENDREDI	LUNDI	MARDI	MARDI	MERCREDI	JEUDI	JEUDI
▪ PL CH AS FROID FR	DIMANCHE	LUNDI	MARDI	MERCREDI	JEUDI	VENDREDI	SAMEDI
▪ COURANT VIANDE	VENDREDI	LUNDI	LUNDI	LUNDI	MERCREDI	MERCREDI	VENDREDI
▪ GARNITURE	VENDREDI	LUNDI	MARDI	MARDI	MERCREDI	JEUDI	JEUDI
▪ GARNITURE FRAGIL	SAMEDI	LUNDI	MARDI	MARDI	MERCREDI	JEUDI	VENDREDI
▪ GARNITURE FROIDE	VENDREDI	LUNDI	MARDI	MARDI	MERCREDI	JEUDI	JEUDI
▪ GARNITURE FROIDE FR	SAMEDI	LUNDI	MARDI	MARDI	MERCREDI	JEUDI	VENDREDI
▪ GARN CH ASS FROID	VENDREDI	LUNDI	MARDI	MARDI	MERCREDI	JEUDI	JEUDI
▪ COURANT GARNITUR	VENDREDI	LUNDI	LUNDI	LUNDI	MERCREDI	MERCREDI	VENDREDI
▪ PATES	VENDREDI	LUNDI	LUNDI	MERCREDI	MERCREDI	VENDREDI	VENDREDI
▪ DESSERT NORMALE	VENDREDI	LUNDI	MARDI	MARDI	MERCREDI	JEUDI	JEUDI
▪ DESSERT FRAGILE	SAMEDI	LUNDI	MARDI	MARDI	MERCREDI	JEUDI	VENDREDI
▪ COURANT DESSERT	VENDREDI	LUNDI	LUNDI	LUNDI	MERCREDI	MERCREDI	VENDREDI
▪ CC PROD LAITIER	DIMANCHE	LUNDI	MARDI	MERCREDI	JEUDI	VENDREDI	SAMEDI
▪ CC EPICERIE	DIMANCHE	LUNDI	MARDI	MERCREDI	JEUDI	VENDREDI	SAMEDI
▪ CC FRUIT	DIMANCHE	LUNDI	MARDI	MERCREDI	JEUDI	VENDREDI	SAMEDI
▪ ENT DESS TR FRAGI	DIMANCHE	LUNDI	MARDI	MERCREDI	JEUDI	VENDREDI	SAMEDI
▪ COM COLL EPICERIE	...?...	...?...	...?...	...?...	...?...	...?...	...?...
▪ CC SURGELE	...?...	...?...	...?...	...?...	...?...	...?...	...?...
▪ CC SELF INTERNAT	...?...	...?...	...?...	...?...	...?...	...?...	...?...
▪ COURANT ROTI DIND	...?...	...?...	...?...	MARDI	MARDI	...?...	...?...

FIGURE A. 22 – Exemple de planning d’une journée de production pour la fabrication des repas de soir.

## A.12 Planning de conditionnement

Paramétrage des Plannings

Planning: PLANNING STANDA Liaison: LF PLATEAU

Semaine: 1 Repas: DEJEUNER

Jours de conditionnement pour les jours de consommation

Groupe de fab.	LUNDI	MARDI	MERCREDI	JEUDI	VENDREDI	SAMEDI	DIMANCHE
00 POTAGE	VENDREDI	LUNDI	LUNDI	LUNDI	JEUDI	JEUDI	JEUDI
01 ENTREE NORMALE	VENDREDI	LUNDI	LUNDI	MARDI	MERCREDI	MERCREDI	JEUDI
02 ENTREE FRAGILE	SAMEDI	LUNDI	LUNDI	MARDI	MERCREDI	JEUDI	VENDREDI
03 ENTREE TRES FRAG	...?...	...?...	...?...	...?...	...?...	...?...	...?...
04 COURANT ENTREE	VENDREDI	LUNDI	LUNDI	LUNDI	MERCREDI	MERCREDI	VENDREDI
05 CC ENTREE	DIMANCHE	LUNDI	MARDI	MERCREDI	JEUDI	VENDREDI	SAMEDI
08 VDE POISSON OEUF	VENDREDI	LUNDI	LUNDI	MARDI	MERCREDI	MERCREDI	JEUDI
09 VIANDE FRAGILE	SAMEDI	LUNDI	LUNDI	MARDI	MERCREDI	JEUDI	VENDREDI
10 VIANDE TRES FRAGI	DIMANCHE	LUNDI	MARDI	MERCREDI	JEUDI	VENDREDI	SAMEDI
11 PL FROID TR FRAG	DIMANCHE	LUNDI	MARDI	MERCREDI	JEUDI	VENDREDI	SAMEDI
12 PLAT FROID FRAGIL	SAMEDI	LUNDI	LUNDI	MARDI	MERCREDI	JEUDI	VENDREDI
13 PLAT FROID	VENDREDI	LUNDI	LUNDI	MARDI	MERCREDI	MERCREDI	JEUDI
14 PLA CH ASS FROID	VENDREDI	LUNDI	LUNDI	MARDI	MERCREDI	MERCREDI	JEUDI
15 PL CH AS FROID FR	DIMANCHE	LUNDI	MARDI	MERCREDI	JEUDI	VENDREDI	SAMEDI
16 COURANT VIANDE	VENDREDI	LUNDI	LUNDI	LUNDI	MERCREDI	MERCREDI	VENDREDI
19 GARNITURE	VENDREDI	LUNDI	LUNDI	LUNDI	MARDI	MERCREDI	MERCREDI
20 GARNITURE FRAGILE	SAMEDI	LUNDI	LUNDI	MARDI	MERCREDI	JEUDI	VENDREDI

Planning PF | Planning PSE

FIGURE A. 23 – Planning de conditionnement des repas.

## A.13 Planning d'expédition des repas

Destination	Jour d'expédition						
	Lundi	Mardi	Mercredi	Jeudi	Vendredi	Samedi	Dimanche
<b>Centre Hospitalier Psychiatrique Brienne</b>	Déjeuner mardi	Dîner mardi Déjeuner mercredi	Dîner mercredi Déjeuner jeudi	Dîner jeudi Déjeuner vendredi Dîner vendredi	Déjeuner samedi Dîner samedi Déjeuner dimanche	Dîner dimanche Déjeuner lundi Dîner lundi	-
<b>Residence comte Henri</b>	Déjeuner lundi Dîner lundi	Déjeuner mardi Dîner mardi	Déjeuner mercredi Dîner mercredi	Déjeuner jeudi Dîner jeudi	Déjeuner vendredi Dîner vendredi	Déjeuner samedi Dîner samedi	Déjeuner dimanche Dîner dimanche
<b>Domaine de Nazareth</b>	Dîner lundi Déjeuner mardi	Dîner mardi Déjeuner mercredi	Dîner mercredi Déjeuner jeudi	Dîner jeudi Déjeuner vendredi	Dîner vendredi Déjeuner samedi	Dîner samedi Déjeuner dimanche	Dîner dimanche Déjeuner lundi
<b>Centre alcoologie J schiffer</b>	Déjeuner lundi Dîner lundi	Déjeuner mardi Dîner mardi	Déjeuner mercredi Dîner mercredi	Déjeuner jeudi Dîner jeudi	Déjeuner vendredi Dîner vendredi	Déjeuner samedi Dîner samedi	Déjeuner dimanche Dîner dimanche
<b>Centre de Rééducation Pasteur</b>	Dîner lundi Déjeuner mardi	Dîner mardi Déjeuner mercredi	Dîner mercredi Déjeuner jeudi	Dîner jeudi Déjeuner vendredi	Dîner vendredi Déjeuner samedi	Dîner samedi Déjeuner dimanche	Dîner dimanche Déjeuner lundi
<b>Restaurant du personnel</b>	Déjeuner lundi	Déjeuner mardi	Déjeuner mercredi	Déjeuner jeudi	Déjeuner vendredi	-	-
<b>Internat</b>	Déjeuner lundi Dîner lundi	Déjeuner mardi Dîner mardi	Déjeuner mercredi Dîner mercredi	Déjeuner jeudi Dîner jeudi	Déjeuner vendredi Dîner vendredi	Déjeuner samedi Dîner samedi	Déjeuner dimanche Dîner dimanche
<b>Clinique Psychiatrique De l'Aube</b>	Déjeuner lundi Dîner lundi	Déjeuner mardi Dîner mardi	Déjeuner mercredi Dîner mercredi	Déjeuner jeudi Dîner jeudi	Déjeuner vendredi Dîner vendredi	Déjeuner samedi Dîner samedi	Déjeuner dimanche Dîner dimanche
<b>Centre Hospitalier Simone Veil</b>	Déjeuner lundi Dîner lundi	Déjeuner mardi Dîner mardi	Déjeuner mercredi Dîner mercredi	Déjeuner jeudi Dîner jeudi	Déjeuner vendredi Dîner vendredi	Déjeuner samedi Dîner samedi	Déjeuner dimanche Dîner dimanche
<b>GHAM Sites hospitaliers de Nogent et Sézanne</b>	Déjeuner mardi Dîner mardi	Déjeuner mercredi Dîner mercredi	Déjeuner jeudi Dîner jeudi Déjeuner vendredi	Dîner vendredi Déjeuner samedi Dîner samedi	-	Déjeuner + Dîner dimanche et lundi	-

TABLE A. 20 – Planning d'expédition des repas de midi et de soir par destinataire.



## A.14 Exemple de plateau de repas servi aux patients



FIGURE A. 24 – Plateau de repas individuel.

## A.15 Ressources matérielles de cuisson



FIGURE A. 25 – Ressources de cuisson disponibles en zone de production chaude.



## A.16 Schémas illustratifs du prétraitement, conditionnement et allotissement



FIGURE A. 26 – Déboîtage des fruits au sirop.



FIGURE A. 27 – Conditionnement de repas en production chaude.



FIGURE A. 28 – Mise en cagettes des repas sur des socles rouleurs.



FIGURE A. 29 – Allotissement des plateaux de repas.

## A.17 Résultats bruts de recueil de données sur terrain

Produit	Matériel	H début préparation	H fin cuisson	H début cond	H fin cond.	Hauteur Sca	H début refroidissement	T°C début refroidissement	n° cellule	Fiche de vie	T°C fin cuisson	H fin refroidissement	T°C fin refroidissement	Quantité	Observations
STEAKS HACHES DE VEAU	sauteuse n°7	6h15	6h15	6h28	6h34	/	6h34	60°C	1	/	71°C	7h25	1°C	54 portions	-
CAROTTES CF ET NATURE CF	four n°3	6h15	6h35	6h35	6h48	/	6h48	37°C	1	/	80°C	7h48	4°C	11 cagettes soit 160 portions	-
PUREE DE P.TERRE AU LAIT ET NATURE (plats)	bac gastronomie	6h25	6h48	6h48	6h57	/	6h57	53°C	2	/	90°C	7h11	8°C	9 cagettes soit 132 portions	-
F. DE POISSON NATURE (plats)	Four n°1 & 2	6h15	6h37	6h37	6h57	/	7h04	39°C	2	/	76°C	7h11	8°C	20 plats gastro de 20 portions	-
F. DE POISSON NATURE (barquettes)	Four n°1 & 2	6h15	6h37	6h57	7h06 7h13 7h16	/	7h06 7h13 7h16	7h06 7h13 7h13	3 3 4	/	76°C	7h42 7h42 7h51	4.5°C 4.5°C 5°C	/	-
SEMOULE COUSCOUS (barquettes)	bac gastronomie	6h33	7h21	7h21	7h23 7h33 7h48 7h55	/	7h23 7h33 7h48 7h55	48°C 38°C 36°C 36°C	4 4 3 3	/	57°C 57°C 60°C 60°C	8h28 8h28 8h28 8h28	6°C 3°C 4.6°C 4.6°C	8 cagettes soit 80p. + 40 1/2p. 6 cagettes soit 120p. 11 cagettes soit 183 + 60 1/2p. 12 cagettes soit 180p.	-
RIZ AU LAIT	marmite mobile	6h42	7h52	7h52	8h20	/	8h36	58°C	3	/	/	9h37	8°C	19 et 18 cagettes de 12 soit 444 parts	-
COQUILLETES CF & NATURE CF	sauteuse n°1	6h40	7h58	8h18	8h50	/	8h35 8h37 8h50 8h50	26 26 24 24	2 2 1 1	/	90°C	9h22 9h22 9h30 9h30	3.6°C 3.6°C 4°C 4°C	/	-
Coquillettes (en plats)	/	/	/	/	/	/	9h31	/	4	/	90°C	10h10	/	3 plats gastro	-
RIZ CF & NATURE CF	sauteuse n°2	6h25	7h38	7h55	8h11 8h18	/	8h11 8h18	30°C 30°C	1 1	/	90°C 90°C	8h50 8h50	8°C 8°C	11 cagettes soit 175p. + 40 1/2p. 10 cagettes soit 154p.	-
SAUTE D'AGNEAU	sauteuse n°1	7h58	11h25	12h04	12h34	/	12h58	/	4	/	/	/	/	/	-
VIANDE COUSCOUS (Hé légumes)	sauteuse n°2	7h52	11h25	11h25	11h40	/	/	/	/	/	/	/	/	/	arrêt de la chaîne pour reconditionner des endives de 11h35 à 11h40
POULET ROTI (d'hier)	four	/	10h50	/	/	/	11h25	55°C	/	/	/	12h30	6°C	2 piles avec en tout 320p.	-
SEMOULE COUSCOUS (plats)	/	/	/	/	/	/	8h35 10h10 10h20 10h23	30°C	4 1 1 3	/	/	9h30 10h45 10h45 10h59	8°C 2.2°C 2.2°C 0.5°C	9 plats de 20 parts soit 180 parts	-
POULETS ROTIS	four n°2	8h38	9h10	9h46	9h58	/	9h55 9h58	59°C	4	/	/	10h56	8°C	/	-
HARICOTS VERTS	four n°3	8h40	9h10	9h27	9h45	/	9h31 9h42 9h45	35°C 35°C 37°C	1 1 3	/	78°C	10h09 10h09 10h25	7.6°C 7.6°C 4.8°C	11 cagettes soit 60p. + 140 1/2p. 6 cagettes soit 96p. + 4 1/2p.	-
CHOUX FLEUR	four n°3	9h51	10h14	/	/	/	11h06	30°C	2	121	86°C	11h33	8°C	/	-
POMMES DE TERRE CUBE	four n°2	9h51	10h14	/	/	/	10h57	43°C	4	/	79°C	11h34	8°C	/	-
SAUCE CURRY	plaques chauffantes mobiles	9h53	12h34	12h34	12h37	2.5 cm 2.2 cm 2.2 cm	13h15	69°C	139	/	90°C	p1	2°C	3 plats	Absence de couvercle
APPAREIL CROQUE MONSIEUR	plaques chauffantes mobiles	9h54	12h34	12h34	12h38	2.0 cm	13h15	70°C	/	/	90°C	p1	2°C	1 plats	Absence de couvercle
RIZ SALADE	marmite n°1	11h10	12h19	/	/	/	12h22 12h28	30	2	/	90°C	/	/	/	-
LEGUMES COUSCOUS (barquettes régimes)	marmite n°2	6h20	10h30	10h30	10h39	/	10h39	68°C	/	/	90°C	11h57	7°C	1 cagette soit 12 barquettes	-
MERGUEZ	four n°1	10h42	11h25	11h25	11h41	/	11h49	36°C	4	/	76°C	12h53	7.6°C	720 parts	-
SAUCE ESTRAGON	marmite n°2	11h57	12h42	12h42	12h44	5.8 cm 5 cm	13h15	76°C	1	137	90°C	P1	2°C	2 plats	-
LEGUMES COUSCOUS (plats)	marmite n°2	6h20	11h39	11h39	11h45	/	12h00	68°C	3	/	90°C	13h10	7°C	/	-
PALERON	sauteuse n°2	11h56	6h30	/	/	/	/	/	/	/	/	/	/	/	-
SAUCE HARISSA	plaques chauffantes mobiles	12h40	12h52	12h52	12h54	5 cm	12h15	65	1	/	90	P1	2	1 plats	-

TABLE A. 21 – Collecte des données sur terrain pour la construction des instances réelles.

Produit	Matériau	H début préparation	H fin cuisson	H début cond.	H fin cond.	Hauteur / So	H début refroidiss	T°C début refroidiss	n° cellule	nbv	T°C fin cuisson	H fin de refroidiss	T°C fin refroidiss	Quantité	Observations	
HARICOTS VERTS CF (barquettes)	four n°2 four n°3 four n°1	0h38 0h11 0h40	0h35	0h35	0h17	/	0h05 0h09 0h15 0h26	34°C 36°C 30°C 49°C	4 4 2 1	8 9 11 12	75°C 75°C 75°C 90°C	0h05 0h05 0h05 0h31	5,5°C	11 cagettes soit 165 barquettes 12 cagettes soit 180 barquettes 11 cagettes soit 165 barquettes 12 cagettes soit 180 barquettes 9 cagettes soit 135 barquettes	-	
HARICOTS VERTS CF (plats)				0h54	0h04	/	0h26	49°C	1	14	90,0°C	0h31	7,3°C	10 plats de 20 parts soit 200 parts	T°C début refroidissement prise dans les barquettes	
PURÉE DE BROCCOLIS	four n°2	0h14	0h50	0h23	0h25	/	0h37	45°C	3	2	83,0°C	0h30	7,7°C	12 barquettes	-	
PURÉE DE HARICOTS VERTS NATURE	four n°2	0h14	0h50	0h22	0h23	/	0h37	45°C	3	190	83,0°C	0h30	7,7°C	12 barquettes	-	
PURÉE DE PETITS POIS NATURE	four n°2	0h14	0h50	0h25	0h27	/	0h37	45°C	3	3	83,0°C	0h30	7,7°C	12 barquettes	-	
PURÉE DE CAROTTES NATURE	four n°2	0h14	0h50	0h27	0h29	/	0h37	45°C	3	4	83,0°C	0h30	7,7°C	11 barquettes	-	
PALETON DE Bœuf	sautreuse n°2	13h56	0h15	conditionnée en salle spécialisée		/	0h45	67°C	4	142	78,4°C	0h05	12,0°C	3 bacs avec 2ou 3 morceaux	Refroidissement au SAS bis	
PURÉE DE POMMES DE TERRE AU LAIT CF	marmite n°1 marmite n°1	0h17 0h29	0h28 0h40	0h28	0h22	/	0h44 0h16 0h24	19°C	1 2 2	188 147 148	7,8°C 10,0°C 8°C	0h51 0h15 0h15	7,8°C 6°C 8°C	7 cagettes soit 135 parts 11 cagettes soit 220 parts 9 cagettes soit 164 parts	-	
TOMATES CUITES + NATURE	four n°1	0h18	0h44	0h29	0h38	/	0h41	/	3	143 144 145	40,0°C	0h30	7,7°C	10 barquettes 8 barquettes 6 cagettes soit 78 barquettes	-	
STEAKS HACHÉS DE VEAU ET JUS CF	sautreuse n°1	0h15	0h40	0h40	0h53	/										
Jus de steak haché	plaques chauffantes mobiles	0h22	0h40	voir ci-dessus		/	0h53	55°C	1°C	140°C	74°C	0h48	3°C	6 cagettes soit 78 total	-	
COLOMBO DE POISSON (barquettes)	sautreuse n°2			0h44	10h29	/	10h18	48°C	4	34	77,0°C	13h09	8,0°C	14 bacs	-	
COLOMBO DE POISSON (plats)	sautreuse n°2	0h20	0h44	0h48	10h02	/	10h14 10h14 10h14 10h21 10h14 10h14	37°C 37°C 37°C 38°C 37°C 37°C	1 1 1 3 2 2	27 28 29 31 32 33	77	13h10 13h10 13h20 13h20	8	4 cagettes soit 54 barquettes 8 cagettes soit 108 barquettes 12 cagettes soit 180 barquettes 12 cagettes soit 180 barquettes 11 cagettes soit 165 barquettes 9 cagettes soit 135 barquettes 3 cagettes soit 43 barquettes	1027 barquettes au total	
poisson - pangas	four n°1 four n°2 four n°3 four n°3	0h07 0h07 0h34 0h35	0h29 0h34 0h34 10h06	voir ci-dessus		/										
MOUSSELINE D'EPINARD	marmite mobile	0h25	0h22	0h22	0h30	/	0h07	61°C	2	15 26	81,0°C	0h55	9,8°C	1 cagette de 12 barquettes 1 cagette soit 12 barquettes	-	
SAUCE MOUTARDE + MIXÉE	sautreuse n°3	0h41	0h03	0h03	0h06	/	3.5 cm 2.0 cm 5.0 cm 4.0 cm 4.0 cm 4.0 cm	81,3°C	3	39	92,0°C	10h31	10,0°C	7 bacs	pas de couvercle	
ENTREMETS VANILLE SANS SUCRE	marmite mobile du potage	0h30	0h25	0h01	0h15	/	0h50	40°C	1	5	/	0h26	5,0°C	1 échelle de 7 plateaux avec 24 entremets soit 168 parts	1 seul pile	
ENTREMETS CHOCOLAT SANS SUCRE	marmite mobile du potage	0h25	0h18	0h18	0h30	/	0h50	40°C	1	6	/	0h26	5,0°C			
ENTREMETS VANILLE SUCRE	marmite n°1 marmite n°2	0h25 0h20	0h05 0h20	0h05 0h20	0h20 0h39	/	0h33 0h56	54°C 42°C	1 3	36 37	90,0°C	10h11 10h34	8,0°C	785 parts	Grosse variation de T°C sur l'échelle [30°C entre haut et milieu]	
POLLE CAMPAGNARDE + NATURE (base + assemblage)	plaques chauffantes mobiles	0h26	10h54	10h54	11h06	/	11h10	45	3	20 29 21	82	11h50	7,64	1 cagette de 10 barquettes 1 cagette de 12 barquettes 7 cagettes soit 100 barquettes	-	
haricots verts + haricots blancs + courgettes	four n°3	10h08	10h50	voir ci-dessus		/										
MOUSSELINE DE PETITS POIS	marmite mobile du potage	0h41	0h10	0h20	0h20	/	0h20	70°C	4	17 26	88,0°C	10h38	8,0°C	1 cagette de 12 barquettes 9 cagettes soit 128 parts	-	
SALMON + SALMON SAUCE BASILIQUE (barquettes)	four n°2	0h25	10h20	10h24	10h47	/	11h02	52°C	1	26 22	75,0°C	12h00	4,0°C	6 cagettes soit 78 barquettes	-	
SALMON + SALMON SAUCE BASILIQUE (plats)				10h47	10h50	/	11h02	52°C	1	25 26	75,0°C	12h00	4,0°C	2 plats	-	
sauce basilic	plaques chauffantes mobiles	0h22	10h23	10h50	10h51	/	11h02	52°C	1	25 26	75,0°C	12h00	4,0°C	1 plat	peu de hauteur de sauce	
SPAGHETTI + NATURE	sautreuse n°2	10h15	11h15			/	/	/	/	/	/	/	/	/	/	-
FILÉTS DE MER	sautreuse n°3	0h20	12h38	11h40	12h23	/	12h06 12h15 12h21 12h25	30°C 50°C 45°C 45°C	1 3 3 4	43 44 45	90,0°C	13h15 13h20 13h20 14h10 (11-13)	7,5°C 8,0°C 8,0°C ?	7 bacs	-	
CARBONARA	sautreuse n°1	0h18	10h48	10h48	10h59	/										
spaghettis	sautreuse n°1	13h04	13h44	12h02	12h20	/	11h05	80	4	49	90	12h05	?	15 plats de 20 parts soit 300 parts	-	
calamars	four n°1	0h40	10h46	voir "fruits de mer"		/	/	/	/	/	/	/	/	/	/	-
SAUCE TOMATES	marmite n°2	10h02	12h23	12h24	12h38	/	3.7 cm 3.2 cm 3.5 cm 3.3 cm	13h10	88°C	4	55	90,0°C	0h15 (1+1)	2,0°C	5 bacs	-
FOND D'ARTICHAUT	sautreuse n°2	10h15	11h15	11h40	12h23	/	12h	42°C	2	52	96,0°C	12h36	8,0°C	4 bacs	-	
SAUCE CREME	plaques chauffantes mobiles	12h02	12h37	12h37	12h38	4.2 cm	13h10	68°C	4	55	90,0°C	0h15 (1+1)	2,0°C	1 bac	-	

TABLE A. 22 – Collecte des données sur terrain pour la construction des instances réelles.

Produit	Méthode	N° de lots / prépa	H/hn cuisson	N° de lots / cuisson	H/hn cuisson	Hauteur / cuisson	N° de lots / refroidissement	Y°C de lots / refroidissement	N° de lots / refroidissement	P/V	Y°C de lots / refroidissement	N° de lots / refroidissement	Y°C de lots / refroidissement	Quantité	
MERLU CITRON + MAÎTRE HOTEL (barquettes)	four n°2	6H10	6H34	6H34	7h19	/	6H55	53°C	2	59	76,0 °C	7h40	6,7°C	4 capettes soit 52 barquettes	
							6H55	53°C	2	57		7h40	6,7°C	1 capette soit 12 barquettes	
							6H55	53°C	2	58		7h40	6,7°C	4 capettes soit 40 barquettes	
							6H59	53°C	2	60		7h40	6,7°C	12 capettes soit 180 barquettes	
							7h06	46°C	3	61		7h05	2°C	12 capettes soit 180 barquettes	
7h12	46°C	3	62	7h05	2°C	11 capettes soit 165 barquettes									
7h20	45°C	4	63	8h05	5°C	6 capettes soit 93 barquettes									
MERLU CITRON + MAÎTRE HOTEL (plats)	four n°3		6H43	6H43	7h09	/	7h20	46,0 °C	4	74	76,0 °C	8h05	5,0 °C	18 plats soit 360 parts	
STEAKS HACHES DE VEAU	sauteuse n°2	6H10				/									
Jus pour steaks hachés	plaques chauffantes mobiles	6H16	6H21	6H21	6H34	/	6H25	63,0 °C	1	85	78,0 °C	7h25	2,0 °C	4 capettes soit 50 barquettes	
SENGOULE ENRICHIE	marmite mobile	6H12	7h09	7h19	7h32	/	7h55	49,0 °C	3	105	91,2 °C	9h05	3,5 °C	11 capettes soit 132 barquettes	
CHIPOLATAS (barquettes)	four n°1	6H16	7h12	7h19	7h48	/	7h35	50°C	1	75	80,0 °C	8h15	0,5°C	8 capettes soit 120 barquettes	
							7h35	50°C	1	76		8h15	0,5°C	12 capettes soit 180 barquettes	
							7h43	39°C	2	77		8h25	4,1°C	11 capettes soit 165 barquettes	
7h50	39°C	2	78	8h25	4,1°C	1 capette soit 6 barquettes									
CHIPOLATAS (plats)						/	7h50	/	2	/	8h25	4,1 °C	2 plats		
MOGETTES	sauteuse n°3	6H18	7h49	8h25	/	/	8h12	/	4	66	100,0 °C	9h07	5°C	4 capettes soit 20 barquettes	
							8h12	/	4	67		9h07	5°C	/	
							8h20	/	1	68		9h15	7,5°C	11 capettes soit 165 barquettes	
							8h20	/	1	69		9h15	7,5°C	10 capettes soit 140 barquettes	
MOGETTES MATURE	plaques chauffantes mobiles	6H25			7h53	7h57	/	8h12	70,0 °C	4	64	100,0 °C	9h08	6,0 °C	2 capettes soit 20 barquettes
RATATOUILLE SANS SEL (barquettes)	sauteuse n°2		9H11	9H39	10H00	/	9H45	63°C	3	84	99,0 °C	10H40	4,5°C	11 capettes soit 165 barquettes	
9H45	63°C	3	84	10H40	4,5°C	10 capettes soit 150 barquettes									
10H15	53°C	2	85	11H15	8°C	12 capettes soit 180 barquettes									
RATATOUILLE SALEE (barquettes)	sauteuse n°1		9H30	9H39	/	/	10H15	53°C	2	86	11H15	8°C	9 capettes soit 135 barquettes		
RATATOUILLE SALEE (plats)			10H01	10H03	/	/	10H15	53,0 °C	2	1	92,0 °C	11H45	6,0 °C	2 plats	
COURGETTES RONDELLES	four n°3		7h23	7h37	7h57	7h55	/	7h55	42,0 °C	3	79	80,0 °C	9h05	3,5 °C	1 capette soit 10 barquettes 2 capettes soit 22 barquettes
MOUSSELINE HARICOTS VERTS	marmite mobile	7h36	9H18	9H18	9h28	/	9h27	68,0 °C	4	70	83,0 °C	10h30	6,0 °C	1 capette soit 12 barquettes 9 capettes soit 112 barquettes	
MOUSSELINE BROCCOLIS	marmite mobile du potage	7h57	9H05	9H05	9h18	/	9h25	68,0 °C	4	72	87,0 °C	10h30	6,0 °C	1 capette soit 12 barquettes 8 capettes soit 112 barquettes	
SALMON (plats + grillés)	four n°1	8H06	9H00	9H18	9h26	/	9h32	54,0 °C	2	95	82,0 °C	10h15	6,0 °C	13 grillés	
FILET MIGNON (grillés)	four n°3	8h25	9H00	/	/	/	9h25	69,0 °C	1	94	77,0 °C	10h22	5,4 °C	4 grillés de environ 10 morceaux	
HAUT DE CURSE DE POULET (plats)	four n°2	8h25	9H00	9h10	9h18	/	9h25	69,0 °C	1	93	98,0 °C	10h30	6,0 °C	5 plats soit 86 parts	
DUOS CHOUX (BROCCOLIS) (barquettes)	four n°1 four n°3	9H00	9H36	10H05	10h37	/	10h25	33	1	80	76,0 °C	11h05	5,8 °C	12 capettes soit 180 barquettes	
							10h25	33	1	80		11h05		5,8 °C	6 capettes soit 90 barquettes
							10h25	33	1	87		11h05		5,8 °C	1 capette soit 18 barquettes
DUOS CHOUX (CHOUX FLEURS) (barquettes)	four n°2 four n°1 four n°3	9H00 9H36	9H36 10H05			/	10h25	33	1	88	11h05	5,8 °C	4 capettes soit 52 barquettes		
10h35	33	4	91	11h15	6,0 °C	12 capettes soit 180 barquettes									
10h35	33	4	92	11h15	6,0 °C	12 capettes soit 180 barquettes									
DUO CHOUX (plats)	four n°2 four n°3	9H00	10H05	10H05	10h30	/	10H43	37,0 °C	3	9	76,0 °C	11H45	6,0 °C	29 plats soit 580 parts	
CHAMPIGNONS PERILLÉS	sauteuse n°2	9H40	10H48	10H50	10H56	/	11H05	63,0 °C	3	98	90,0 °C	12h00	3,5 °C	1 capettes soit 12 barquettes 3 capettes soit 36 barquettes	
SAUCE CHASSEUR	plaques chauffantes mobiles	9H55	12H13	12H13	12H14	4,5 cm	/	/	/	/	/	/	/	/	
ENDIVES AU FOUR	four n°3	10h34	10H49	10H56	11h30	/	11h05	40,0 °C	1	96	74,0 °C	12h00	3,7 °C	1 capette soit 12 barquettes 2 capettes soit 24 barquettes	
PINTADE ROTIE (barquettes)	four n°1 four n°2	10H49 10H56	12h40	12h40	12h16	12h18	/	12h00	65,0 °C	2	103	97,0 °C	12h30	7,5 °C	11 capettes soit 165 barquettes 12 capettes soit 176 barquettes
								12h20	53,0 °C	4	/	/	/	/	
Jus pour les pintades	sauteuse n°2	10H52	12h40	/	/	/	/	/	/	/	/	/	/	/	
APPAREIL POUR TARTELETTE	marmite mobile	10H45	12H05	12H05	12H06	3,7 cm	12h20	53,0 °C	4	55	90,0 °C	P1	2,0 °C	5 bacs	
HARICOTS VERTS	four n°3	11h03	11h40	11h52	12h02	/	12h05	48,0 °C	1	12	80,0 °C	P1	2,0 °C	5 plats soit 100 parts	
POMMES DE TERRE						/	12h05	48,0 °C	1	12	80,0 °C	P1	2,0 °C	8 plats soit 160 parts	
PRIMEAUX	four n°3	11h40	12h05	/	/	4,0 cm 4,7 cm 5,0 cm	12h20	64,0 °C	4	14/138	88,0 °C	P1	2,0 °C	4 capettes soit 145 barquettes	

TABLE A. 23 – Collecte des données sur terrain pour la construction des instances réelles.

## A.18 Plannings d'organisation des journées de production

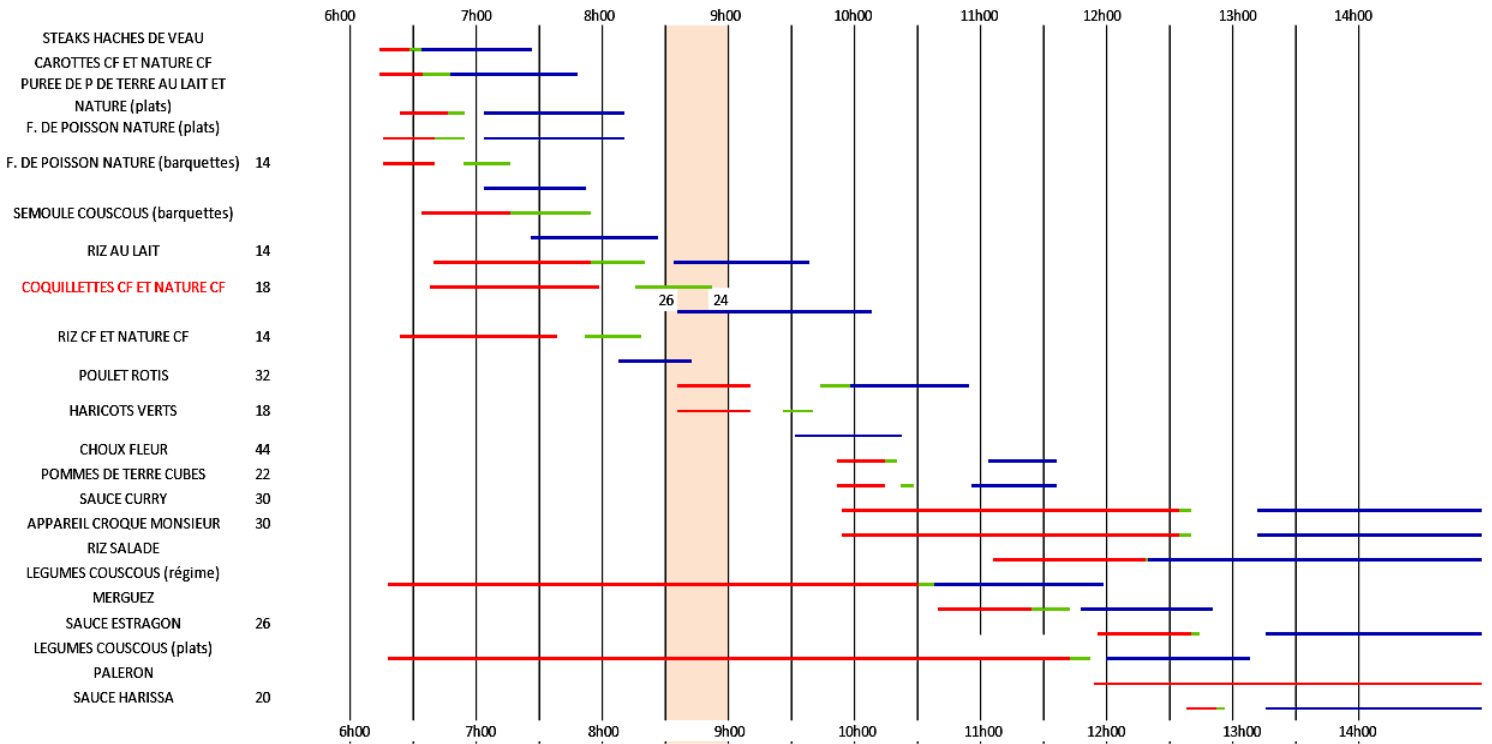


FIGURE A. 30 – Planning d'une organisation réelle d'une journée de production.

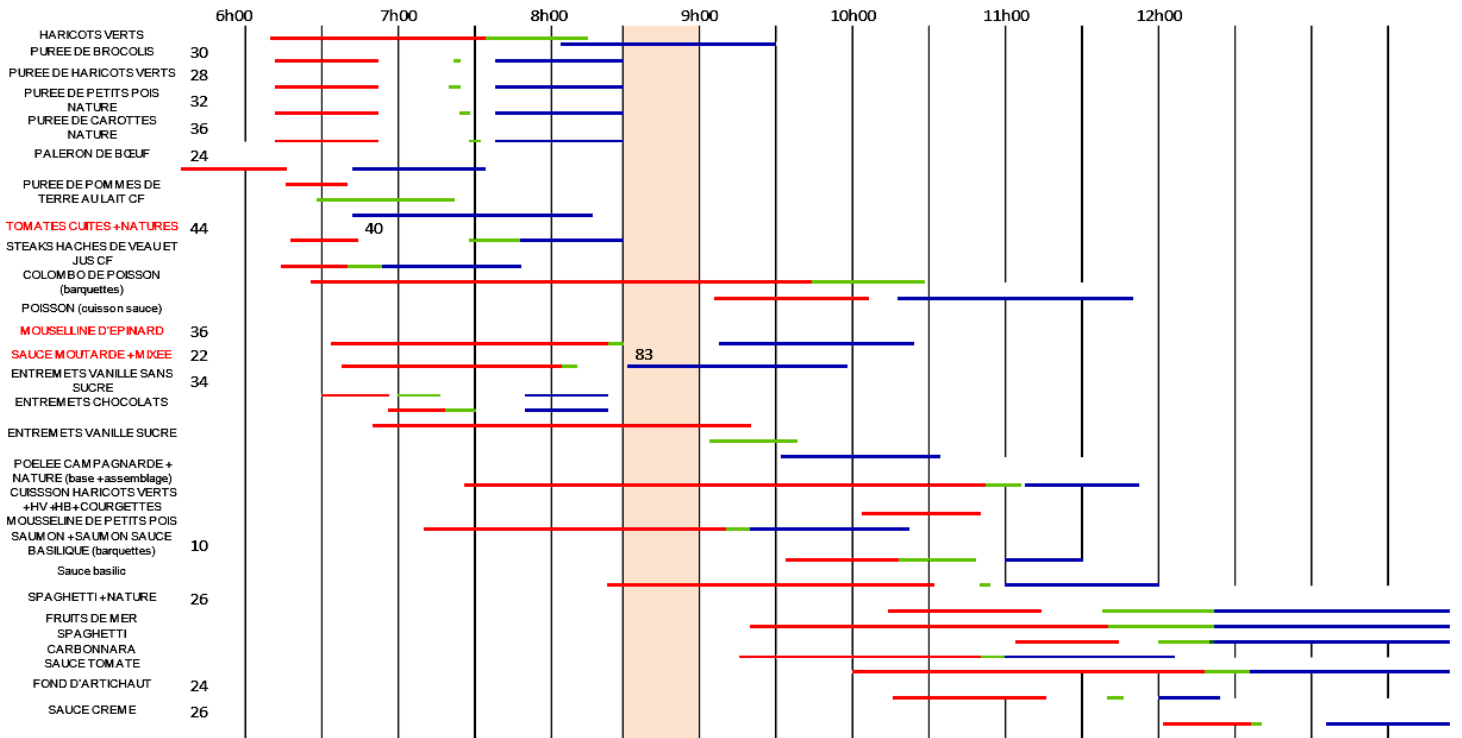


FIGURE A. 31 – Planning d'une organisation réelle d'une journée de production.



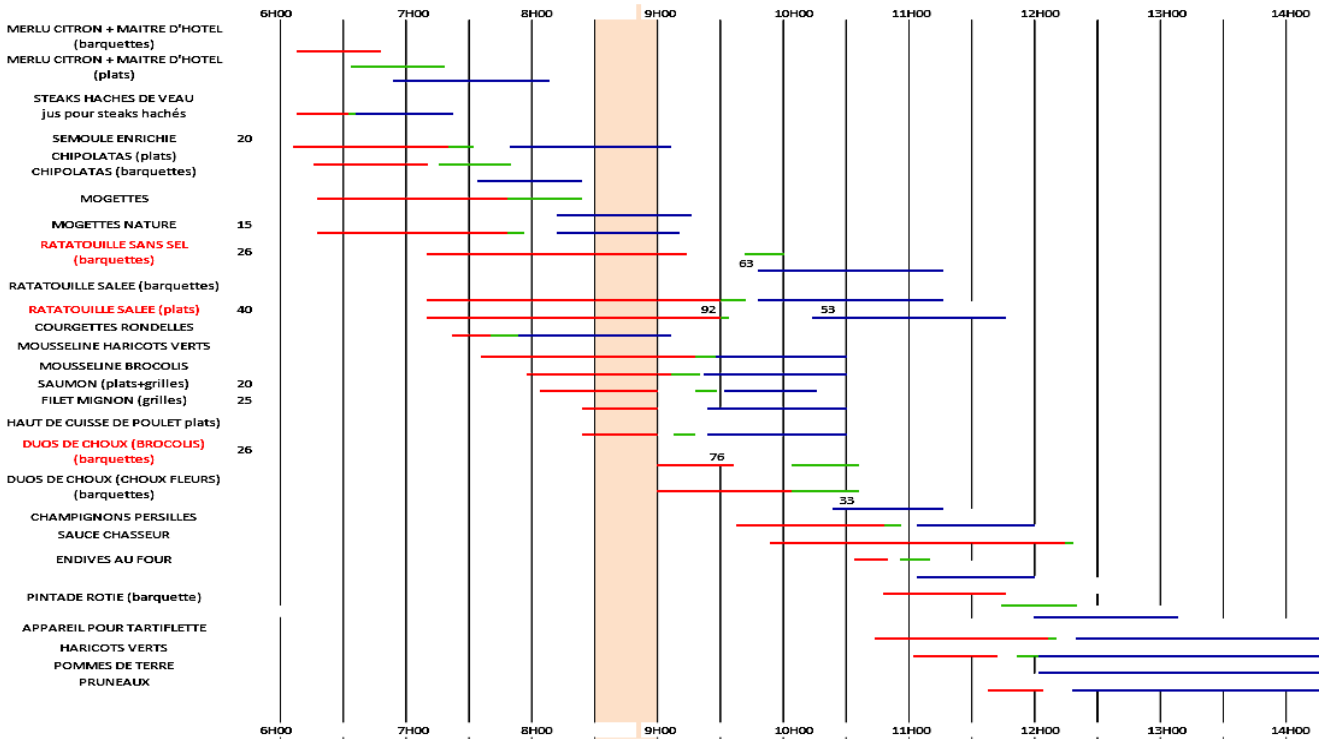


FIGURE A. 32 – Planning d'une organisation réelle d'une journée de production.

### A.19 Taux d'occupation des machines

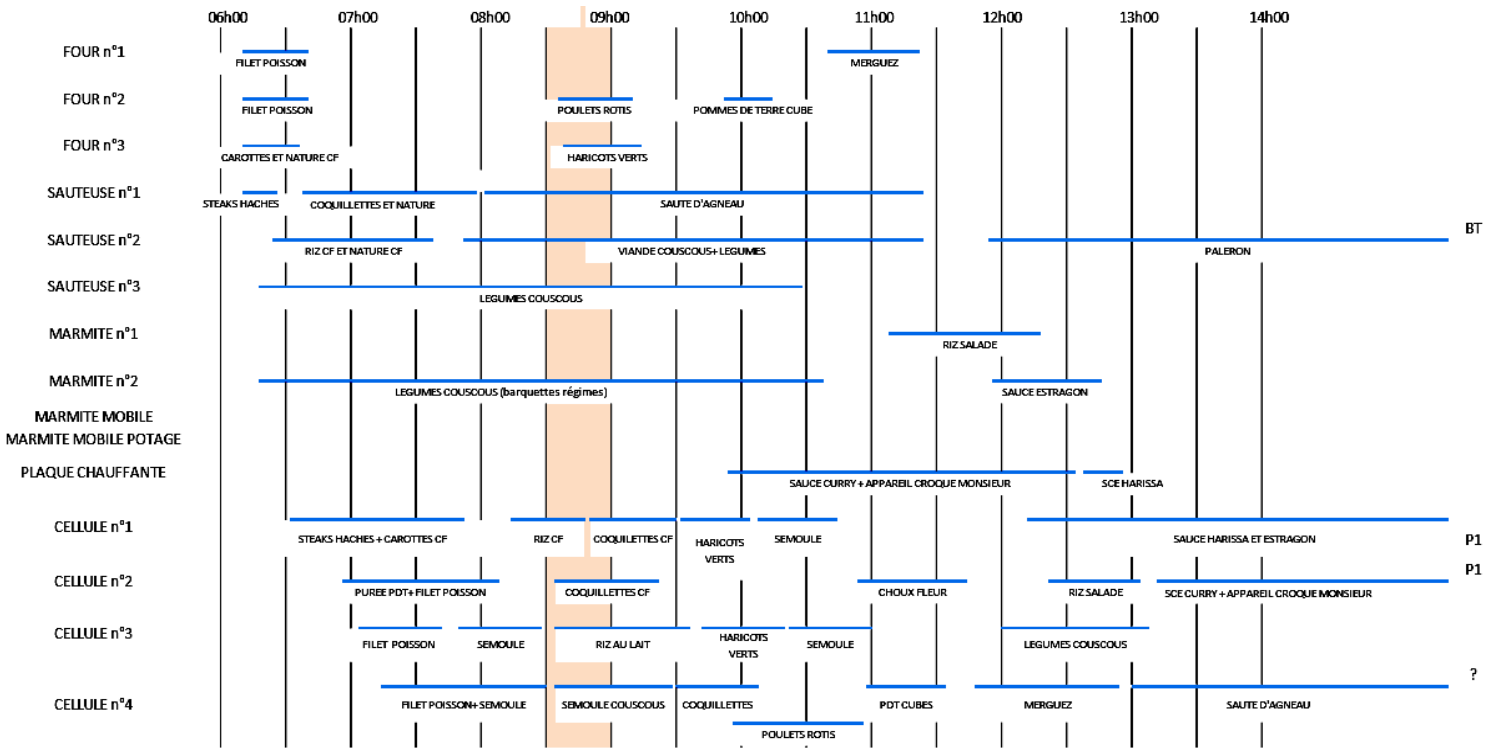


FIGURE A. 33 – Taux d'occupation des ressources sur une journée réelle de production.

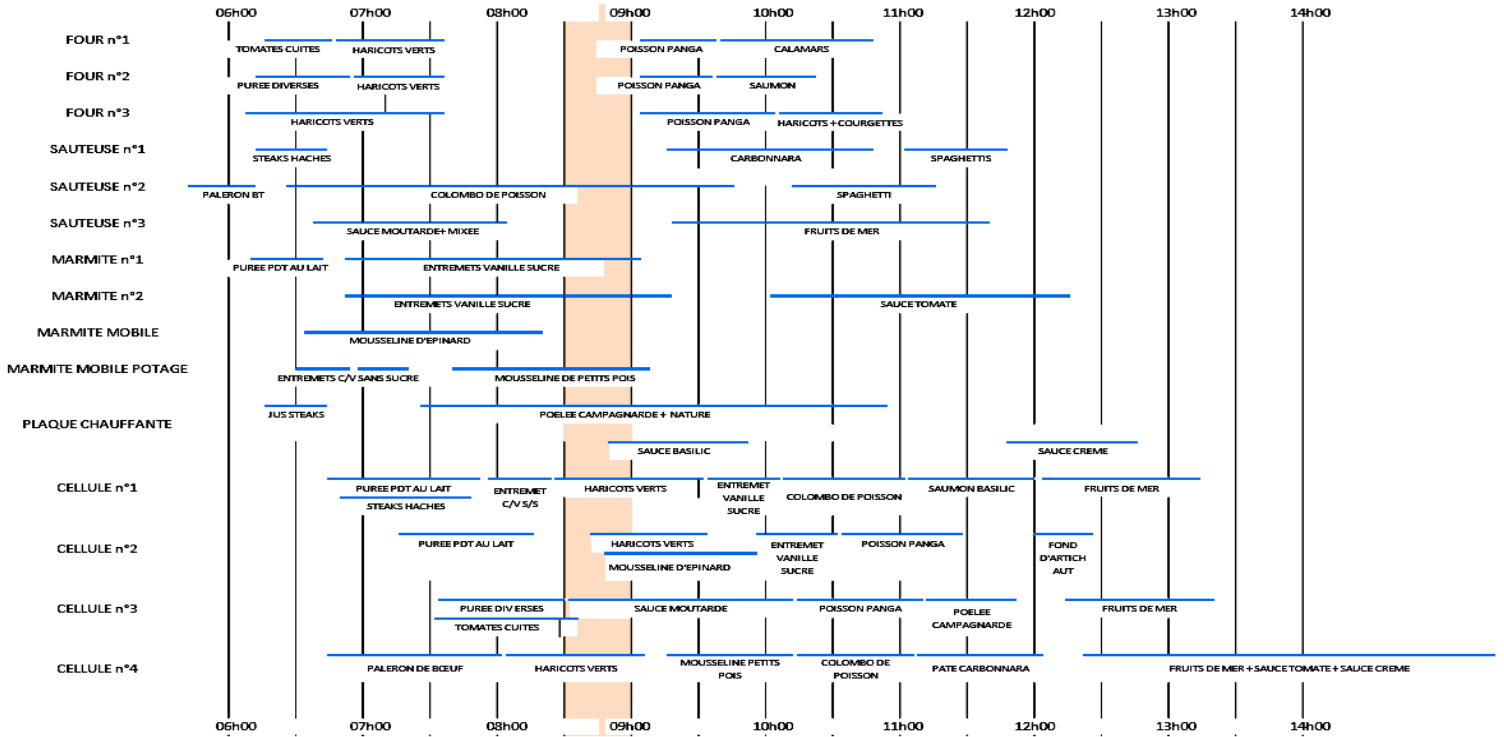


FIGURE A. 34 – Taux d’occupation des ressources sur une journée réelle de production.

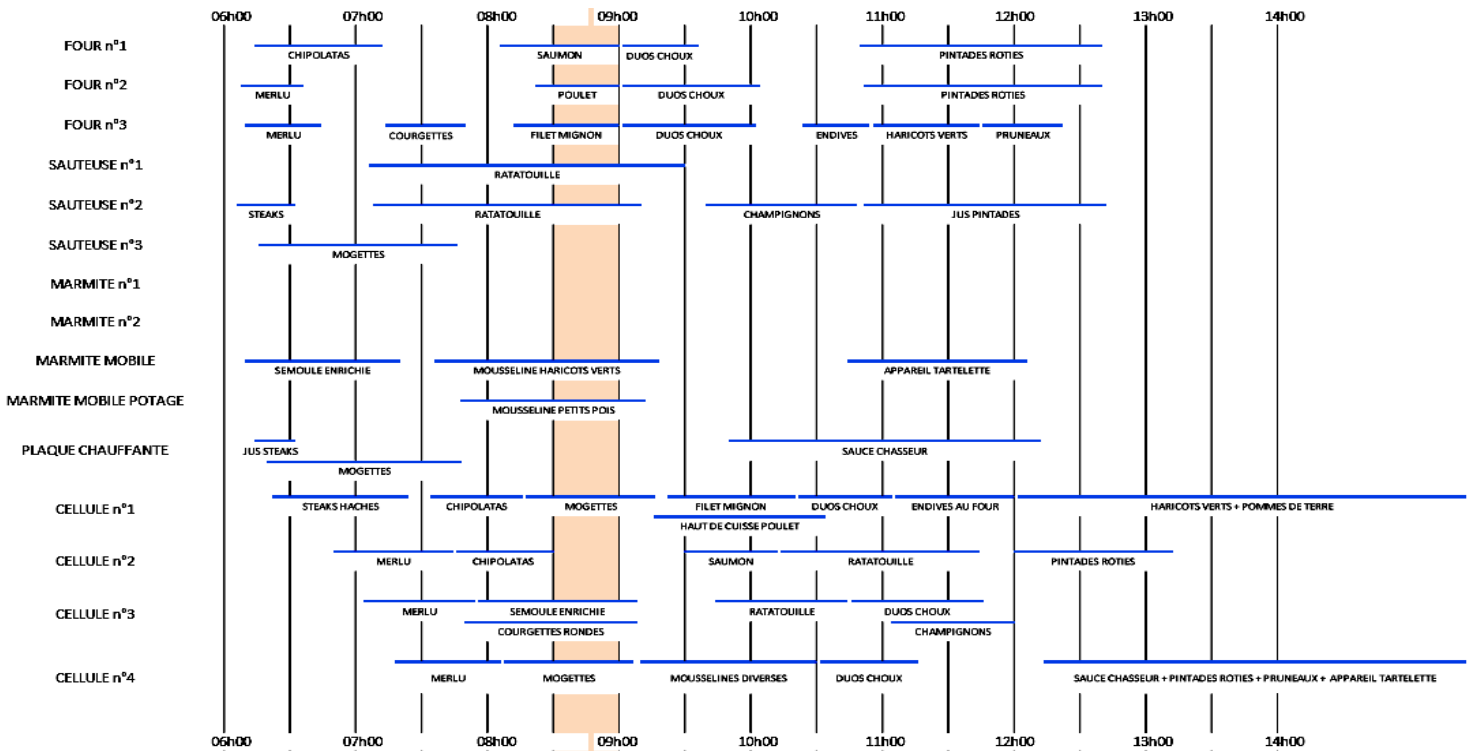


FIGURE A. 35 – Taux d’occupation des ressources sur une journée réelle de production.







## A.21 Exportation des résultats

```

1 Start[0][0][0][0]= 8.16462666664   Start[1][0][0][0]= 8.646859999966   Start[2][0][0][0]= 7.06586333332   Start[3][0][0][0]= 8.547526666636
2 Finish[0][0][0][0]= 8.24762666666   Finish[1][0][0][0]= 8.896859999966   Finish[2][0][0][0]= 7.31586333333   Finish[3][0][0][0]= 8.56352666663
3 Start[0][0][1][13]= 8.24762666666   Start[1][0][1][2]= 9.581899999975   Start[2][0][1][6]= 7.31586333332   Start[3][0][1][4]= 8.915799999986
4 Finish[0][0][1][13]= 8.40762666666   Finish[1][0][1][2]= 10.08189999999   Finish[2][0][1][6]= 7.73186333333   Finish[3][0][1][4]= 9.331799999988
5 Start[0][0][2][0]= 8.46422666663   Start[1][0][2][18]= 11.96292666666   Start[2][0][2][19]= 7.73186333333   Start[3][0][2][20]= 9.432466666666
6 Finish[0][0][2][0]= 8.46422666666   Finish[1][0][2][18]= 12.21292666666   Finish[2][0][2][19]= 8.23186333333   Finish[3][0][2][20]= 9.515466666666
7 Start[0][0][3][20]= 8.46422666666   Start[1][0][3][28]= 12.21292666666   Start[2][0][3][22]= 8.93256666666   Start[3][0][3][24]= 10.08266333333
8 Finish[0][0][3][20]= 8.62422666666   Finish[1][0][3][28]= 12.21292666666   Finish[2][0][3][22]= 10.18256666666   Finish[3][0][3][24]= 11.33266333333
9 Start[0][0][4][21]= 8.99846333333   Start[2][0][4][28]= 10.18256666666   Start[3][0][4][28]= 11.83266333333
10 Finish[0][0][4][21]= 9.82846333333   Finish[2][0][4][28]= 10.18256666666   Finish[3][0][4][28]= 11.91566333333
11 Start[0][0][5][28]= 9.82846333333
12 Finish[0][0][5][28]= 9.82846333333
13
14 Start[4][0][0][1]= 8.24913333331   Start[5][0][0][1]= 8.856033333316   Start[6][0][0][1]= 10.35259999997   Start[7][0][0][0]= 7.032863333200
15 Finish[4][0][0][1]= 8.40913333333   Finish[5][0][0][1]= 10.18603333333   Finish[6][0][0][1]= 10.36859999999   Finish[7][0][0][1]= 7.06586333320
16 Start[4][0][1][2]= 8.81566666664   Start[5][0][1][5]= 10.18603333331   Start[6][0][1][4]= 10.36859999997   Start[7][0][1][5]= 7.279233333260
17 Finish[4][0][1][2]= 8.89866666666   Finish[5][0][1][5]= 10.51603333333   Finish[6][0][1][4]= 10.69859999999   Finish[7][0][1][5]= 7.69523333326
18 Start[4][0][2][18]= 9.28196666666   Start[5][0][2][20]= 10.51603333333   Finish[6][0][2][20]= 10.76603333333   Start[7][0][2][19]= 7.69523333326
19 Finish[4][0][2][18]= 9.36496666666   Finish[5][0][2][20]= 10.76603333333   Finish[6][0][2][20]= 10.78203333333   Finish[7][0][2][19]= 7.72823333326
20 Start[4][0][3][28]= 9.36496666666   Start[5][0][3][27]= 10.76603333333   Start[6][0][3][21]= 10.78203333333   Start[7][0][3][23]= 7.72823333326
21 Finish[4][0][3][28]= 9.38096666666   Finish[5][0][3][27]= 12.26603333333   Finish[6][0][3][21]= 12.28203333333   Finish[7][0][3][23]= 8.89523333332
22 Start[5][0][4][28]= 12.26603333333   Start[6][0][4][28]= 12.28203333333   Start[7][0][4][28]= 8.89523333332
23 Finish[5][0][4][28]= 12.26603333333   Finish[6][0][4][28]= 12.28203333333   Finish[7][0][4][28]= 8.89523333332
24
25 Start[8][0][0][1]= 9.12443333331   Start[9][0][0][1]= 9.407033333316   Start[10][0][0][1]= 6.78323333332   Start[11][0][0][0]= 9.3466599999560
26 Finish[8][0][0][1]= 9.20743333333   Finish[9][0][0][1]= 9.57303333331   Finish[10][0][0][1]= 6.94923333333   Finish[11][0][0][0]= 9.479599999956
27 Start[8][0][1][3]= 9.66429666665   Start[9][0][1][12]= 9.57303333331   Start[10][0][1][5]= 6.94923333332   Start[11][0][1][2]= 10.63596666663
28 Finish[8][0][1][3]= 9.91429666666   Finish[9][0][1][12]= 9.98963333333   Finish[10][0][1][5]= 7.27923333333   Finish[11][0][1][2]= 10.80196666663
29 Start[8][0][2][18]= 10.06453333333   Start[9][0][2][22]= 10.18256666666   Start[10][0][2][19]= 7.27923333333   Start[11][0][2][18]= 11.79692666661
30 Finish[8][0][2][18]= 10.14783333333   Finish[9][0][2][22]= 10.51256666666   Finish[10][0][2][19]= 7.36253333333   Finish[11][0][2][18]= 11.96292666666
31 Start[8][0][3][28]= 10.14783333333   Start[9][0][3][19]= 10.69919999999   Start[10][0][3][26]= 7.36253333333   Start[11][0][3][28]= 11.96292666661
32 Finish[8][0][3][28]= 10.14783333333   Finish[9][0][3][19]= 10.78249999999   Finish[10][0][3][26]= 8.44583333333   Finish[11][0][3][28]= 11.96292666666
33 Start[9][0][4][28]= 10.91579999999   Start[10][0][4][28]= 8.44583333333   Finish[10][0][4][28]= 8.44583333333
34 Finish[9][0][4][28]= 10.91579999999   Finish[10][0][4][28]= 8.44583333333
35
36 Start[12][0][0][0]= 6.88332999999   Start[13][0][0][1]= 8.40913333331   Start[14][0][0][1]= 6.66666666666   Start[15][0][0][0]= 7.315863333200
37 Finish[12][0][0][0]= 6.91632999999   Finish[13][0][0][1]= 8.54213333333   Finish[14][0][0][1]= 6.68326666666   Finish[15][0][0][0]= 7.33246333320
38 Start[12][0][1][3]= 6.91632999999   Start[13][0][1][15]= 8.54213333333   Start[14][0][1][15]= 6.68326666666   Start[15][0][1][14]= 7.33246333320
39 Finish[12][0][1][3]= 6.94932999999   Finish[13][0][1][15]= 8.87213333333   Finish[14][0][1][15]= 6.69986666666   Finish[15][0][1][14]= 7.4984633332
40 Start[12][0][2][18]= 6.99996666666   Start[13][0][2][20]= 9.34916666666   Start[14][0][2][20]= 6.69986666666   Start[15][0][2][27]= 7.49846333320
41 Finish[12][0][2][18]= 7.03299666666   Finish[13][0][2][20]= 9.43246666666   Finish[14][0][2][20]= 6.71646666666   Finish[15][0][2][27]= 8.3314633332
42 Start[12][0][3][28]= 7.03299666666   Start[13][0][3][24]= 9.58266333333   Start[14][0][3][25]= 6.71646666666   Start[15][0][3][20]= 8.33146333320
43 Finish[12][0][3][28]= 7.03299666666   Finish[13][0][3][24]= 10.08266333333   Finish[14][0][3][25]= 7.21646666666   Finish[15][0][3][20]= 8.3480633332
44 Start[13][0][4][28]= 10.08266333333   Start[14][0][4][28]= 7.21646666666   Finish[15][0][4][28]= 8.44583333333
45 Finish[13][0][4][28]= 10.08266333333   Finish[14][0][4][28]= 7.21646666666   Finish[15][0][4][28]= 8.44583333333

```

FIGURE A. 37 – Exportation des résultats d’une instance avec 15 tâches, 76 opérations et 29 machines dans un fichier de sortie TXT.

## A.22 Exemple d'une instance réelle de production

Plat	Quantité	N° Gamme	Prétraitement		Production Froide		Production Chaude			Conditionnement		Refroissement	Allotissement	
			Durée	Nb agent	Durée	Nb agent	Durée	Matériel	Nb agent	Durée	Nb agent		Durée	Durée
1. Barquette sauce	64	2	5 mn	1	10 mn	1	10 mn	Marmite (80L)	1	10 mn	2	50 mn	5 mn	1
2. Betteraves vinaigrette (GAR)	141	1	15 mn	1	30 mn	1	-	-	-	15 mn	2	-	5 mn	1
3. Blé	326	5	15 mn	1	-	-	25 mn	Four (G2/1)	1	30 mn	2	01h15	5 mn	1
4. Blé nature	15	5	1 mn	1	-	-	25 mn	Four (G2/1)	1	5 mn	2	01h15	5 mn	1
5. Carottes râpées VGT	31	1	10 mn	1	5 mn	1	-	-	-	5 mn	2	-	1 mn	1
6. Carottes vichy	163	5	20 mn	1	-	-	20 mn	Four (GN1/1)	1	15 mn	2	01h30	5 mn	1
7. Carottes vichy nature	8	5	1 mn	1	-	-	20 mn	Four (GN1/1)	1	1 mn	2	01h30	1 mn	1
8. Cordiale légumes	1262	5	1h00	1	-	-	25 mn	Four (GN2/1)	1	1h00	3	01h10	15 mn	1
9. Cordiale légumes nature	12	5	2 mn	1	-	-	25 mn	Four (GN2/1)	1	2 mn	3	01h10	1 mn	1
10. Crème fraîche	140	1	5 mn	1	15 mn	1	-	-	-	5 mn	2	-	2 mn	1
11. Crème Praline (S/ sucre)	211	6	10 mn	1	-	-	25 mn	Marmite (150L)	1	5 mn	2	20 mn	3 mn	1
12. Croquettes agneau sauce ail	39	5	10 mn	1	-	-	20 mn	Four (GN1/1)	1	5 mn	2	01h05	2 mn	1
13. Demi-pamplemousse	71	1	8 mn	1	10 mn	1	-	-	-	10 mn	2	-	2 mn	1
14. Demi-pamplemousse sans sucre	14	1	2 mn	1	2 mn	1	-	-	-	2 mn	2	-	1 mn	1
15. Escalope volaille	15	5	8 mn	1	-	-	20 mn	Sauteuse	1	5 mn	2	30 mn	2 mn	1
16. Escalope volaille nature	3	5	1 mn	1	-	-	1 mn	Sauteuse	1	1 mn	2	30 mn	1 mn	1
17. Sauce Gigot	8	6	1 mn	1	-	-	10 mn	Marmite (80L)	1	1 mn	2	50 mn	1 mn	1
18. Gigot	8	1	1 mn	1	2 mn	1	-	(Cuit sous vide)	-	5 mn	2	-	1 mn	1
19. Gigot froid	192	1	15 mn	2	45 mn	2	-	(Cuit sous vide)	-	15 mn	2	-	5 mn	1
20. Gigot nature	12	1	1 mn	1	2 mn	1	-	(Cuit sous vide)	-	5 mn	2	-	1 mn	1
21. Gougère	24	6	5 mn	1	-	-	40 mn	Four (GN1/1)	1	5 mn	2	40 mn	1 mn	1
22. Sauce Haché agneau	193	6	5 mn	1	-	-	20 mn	Marmite (80L)	1	15 mn	2	50 mn	2 mn	1
23. Haché agneau	193	1	5 mn	1	40 mn	1	-	-	-	15 mn	2	-	5 mn	1
24. Haché agneau nature	1	1	1 mn	1	1 mn	1	-	-	-	1 mn	2	-	1 mn	1
25. Sauce Haché dinde	25	6	5 mn	1	-	-	20 mn	Marmite (80L)	1	5 mn	2	50 mn	2 mn	1
26. Haché dinde	25	1	5 mn	1	10 mn	1	-	-	-	5 mn	2	-	1 mn	1
27. Haché poisson	3	1	1 mn	1	2 mn	1	-	-	-	1 mn	2	-	2 mn	1
28. Sauce duglere	261	6	5 mn	1	-	-	30 mn	Marmite (80L)	1	15 mn	2	50 mn	5 mn	1
29. Haché poisson Sauce duglere	261	1	5 mn	1	40 mn	1	-	-	-	20 mn	2	-	5 mn	1
30. Haricots verts nature	6	5	2 mn	1	-	-	20 mn	Four (GN1/1)	1	1 mn	2	45 mn	1 mn	1
31. Haricots verts sautes	112	5	15 mn	1	-	-	20 mn	Four (GN1/1)	1	10 mn	2	45 mn	3 mn	1
32. Jambon blanc	35	1	5 mn	1	10 mn	1	-	-	-	5 mn	2	-	2 mn	1
33. Jambon blanc nature s/sel	1	1	1 mn	1	1 mn	1	-	-	-	1 mn	1	-	1 mn	1
34. Maquereau vin blanc	18	1	10 mn	1	10 mn	1	-	-	-	5 mn	2	-	1 mn	1
35. Melon	186	1	20 mn	1	30 mn	1	-	-	-	15 mn	2	-	5 mn	1
36. Œufs durs	52	1	5 mn	1	15 mn	1	-	-	-	10 mn	2	-	5 mn	1
37. Œufs mixe vinaigrette	4	1	1 mn	1	1 mn	1	-	-	-	1 mn	2	-	1 mn	1
38. Œufs nature	11	1	1 mn	1	2 mn	1	-	-	-	2 mn	2	-	1 mn	1
39. Œufs vinaigrette	33	1	2 mn	1	5 mn	1	-	-	-	4 mn	2	-	2 mn	1
40. Omelette	82	1	10 mn	1	15 mn	1	-	-	-	10 mn	2	-	3 mn	1
41. Papillons	1227	5	23 mn	1	-	-	20 mn	Sauteuse	1	50 mn	3	01h15	15 mn	1
42. Papillons nature	75	5	5 mn	1	-	-	20 mn	Sauteuse	1	8 mn	3	01h15	2 mn	1
43. Papillons sauce tomate	8	5	2 mn	1	-	-	20 mn	Sauteuse	1	2 mn	3	01h15	1 mn	1
44. Pate de foie	12	1	3 mn	1	5 mn	1	-	-	-	3 mn	2	-	1 mn	1
45. Pate de foie (mouliné)	14	1	2 mn	1	5 mn	1	-	-	-	2 mn	2	-	1 mn	1
46. Paupiette veau sauce forestière	1010	5	45 mn	1	-	-	30 mn	Four GN 2 /1	1	01h00	3	01h30	15 mn	1
47. Pavé saumon nature	12	5	5 mn	1	-	-	15 mn	Four (GN1/1)	1	3 mn	2	30 mn	1 mn	1
48. Poireaux braises	141	5	28 mn	1	-	-	30 mn	Four (GN1/1)	1	20 mn	2	01h00	5 mn	1
49. Poireaux nature	9	5	2 mn	1	-	-	30 mn	Four (GN1/1)	1	2 mn	2	-	1 mn	1
50. Poisson duglere	1183	5	45 mn	1	-	-	20 mn	Four (GN2/1)	1	01h00	3	45 mn	15 mn	1
51. Poisson poche	132	5	5 mn	1	-	-	20 mn	Four (GN1/1)	1	10 mn	3	35 mn	5 mn	1
52. Poisson poche nature	35	5	2 mn	1	-	-	20 mn	Four (GN1/1)	1	5 mn	3	35 mn	2 mn	1
53. Pomme cuite sans sucre	12	1	5 mn	1	5 mn	1	-	-	-	5 mn	1	-	1 mn	1
54. Pommes de terre vinaigrette	182	1	15 mn	1	30 mn	1	-	-	-	20 mn	2	-	5 mn	1
55. Pommes vapeur	5	1	5 mn	1	3 mn	1	-	-	-	3 mn	1	-	1 mn	1
56. Pruneaux	6	1	5 mn	1	3 mn	1	-	-	-	3 mn	1	-	1 mn	1
57. Purée de carottes	264	2	15 mn	1	30 mn	1	20 mn	Four (GN2/1)	1	25 mn	2	01h15	5 mn	1
58. Purée de jardinière	264	1	5 mn	1	20 mn	1	-	-	-	25 mn	2	-	5 mn	1
59. Purée de PDT	518	1	10 mn	1	01h00	1	-	-	-	40mn	2	-	10 mn	1
60. Purée de PDT nature	26	1	2 mn	1	5 mn	1	-	-	-	5 mn	2	-	1 mn	1
61. Riz	207	5	20 mn	1	-	-	30 mn	Four (GN1/1)	1	30 mn	2	01h30	5 mn	1
62. Riz nature	10	5	5 mn	1	-	-	30 mn	Four (GN1/1)	1	2 mn	2	01h30	1 mn	1
63. Sauce Rosbeef	14	6	5 mn	1	-	-	15 mn	Marmite (80L)	1	2 mn	2	50 mn	1 mn	1
64. Rosbeef	14	1	5 mn	1	8 mn	1	-	(Cuit sous vide)	-	5 mn	2	-	1 mn	1
65. Rosbeef froid nature	2	1	1 mn	1	2 mn	1	-	(Cuit sous vide)	-	1 mn	2	-	1 mn	1
66. Sauce Roti de veau	72	6	5 mn	1	-	-	15 mn	Marmite (80L)	1	5 mn	2	50 mn	3 mn	1
67. Roti de veau	72	1	8 mn	1	25 mn	1	-	(Cuit sous vide)	-	8 mn	2	-	3 mn	1
68. Roti de veau nature	15	1	2 mn	1	5 mn	1	-	(Cuit sous vide)	-	2 mn	2	-	1 mn	1
69. Salade paysanne	665	1	01h30	1	45 mn	1	-	-	-	01h00	3	-	15 mn	1
70. Salade riz nicois au thon	25	1	5 mn	1	5 mn	1	-	-	-	5 mn	2	-	1 mn	1
71. Salade verte	20	1	1 mn	1	1 mn	1	-	-	-	1 mn	2	-	1 mn	1
72. Salade verte nature	16	1	1 mn	1	1 mn	1	-	-	-	1 mn	2	-	1 mn	1
73. Salade verte VGTTE	106	1	5 mn	1	5 mn	1	-	-	-	8 mn	2	-	3 mn	1
74. Sauce tomate	5	1	5 mn	1	5 mn	1	-	-	-	2 mn	1	-	1 mn	1
75. Steak haché	90	1	5 mn	1	5 mn	1	-	-	-	10 mn	1	-	2 mn	1
76. Steak haché nature	7	1	1 mn	1	1 mn	1	-	-	-	1 mn	1	-	1 mn	1
77. Tartie aux 3 fromages	1148	2	15 mn	1	30 mn	1	30 mn	Four (GN2/1)	1	01h15	3	01h00	15 mn	1
78. Terrine de légumes	466	1	10 mn	1	01h00	2	-	-	-	30 mn	3	-	10 mn	1
79. Terrine de légumes nature	37	1	2 mn	1	10 mn	1	-	-	-	3 mn	3	-	1 mn	1
80. Potage	1500	5	20 mn	1	-	-	03h00	Marmite (400 L)	1	01h20	2	01h35	30 mn	1
81. Potage enrichi	553	5	10 mn	1	-	-	03h00	Marmite (300 L)	1	30 mn	2	01h10	10 mn	1
82. Tarte aux fraises	84	7	10 mn	1	01h40	1	25 mn	Four (GN1/1)	1	15 mn	1	10 mn	1 mn	1

TABLE A. 24 – Instance réelle de production avec 82 plats, 370 opérations et 29 machines.



## A.23 Exemple de planning de production d'une instance réelle

Plat	Prétraitement		Production Froide		Production Chaude		Refrédissement		Conditionnement		Durée totale	Solution algorithme génétique	
	(Début-Fin)	Machine	(Début-Fin)	Machine	(Début-Fin)	Machine	(Début-Fin)	Machine	(Début-Fin)	Machine		Début	Fin
1 Barquette sauce	7h04 - 7h09	Machine 0	-	-	7h09 - 7h19	Machine 14	7h29 - 8h29	Machine 27	7h19 - 7h29	Machine 20	1h25	7h04	08h29
2 Betteraves vinaigrette (GAR)	13h02 - 13h17	Machine 1 Plan 2	13h17 - 13h47	Machine 3 Plan 2	-	-	-	-	13h49 - 14h02	Machine 18	1h00	13h02	14h02
3 Blé	6h38 - 6h53	Machine 0	-	-	6h53 - 7h18	Machine 4	7h49 - 9h03	Machine 25	7h18 - 7h48	Machine 19	2h25	6h38	09h03
4 Blé nature	6h38 - 6h53	Machine 0	-	-	6h53 - 7h18	Machine 4	7h49 - 8h24	Machine 25	7h18 - 7h48	Machine 19	1h46	6h38	08h24
5 Carottes râpées VGT	8h53 - 9h03	Machine 0	9h05 - 9h10	Machine 2	-	-	-	-	9h10 - 9h15	Machine 18	0h20	8h53	09h15
6 Carottes vichy	7h54 - 8h14	Machine 1 Plan 2	-	-	8h14 - 8h34	Machine 5	8h49 - 10h19	Machine 23	8h34 - 8h49	Machine 19	2h25	7h54	10h19
7 Carottes vichy nature	7h54 - 8h14	Machine 1 Plan 2	-	-	8h14 - 8h34	Machine 5	8h49 - 9h46	Machine 23	8h34 - 8h49	Machine 19	1h52	7h54	09h46
8 Cordiale légumes	10h48 - 11h48	Machine 0	-	-	11h48 - 12h13	Machine 6	13h13 - 14h23	Machine 25	12h13 - 13h13	Machine 20	3h35	10h48	14h23
9 Cordiale légumes nature	10h48 - 10h50	Machine 0	-	-	10h50 - 11h15	Machine 6	11h15 - 12h25	Machine 25	12h25 - 12h27	Machine 20	1h39	10h48	12h27
10 Crème fraîche	6h49 - 6h54	Machine 1	6h54 - 7h09	Machine 2	-	-	-	-	7h09 - 7h14	Machine 18	0h25	6h49	07h14
11 Crème Praline (S/ sucre)	7h24 - 7h34	Machine 1 Plan 2	-	-	7h34 - 7h59	Machine 13	7h59 - 8h19	Machine 22	8h19 - 8h24	Machine 19	1h00	7h24	08h24
12 Croquettes agneau sauce ail	7h44 - 7h54	Machine 1 Plan 2	-	-	7h54 - 8h14	Machine 5	8h24 - 9h24	Machine 26	8h19 - 8h24	Machine 20	1h40	7h44	09h24
13 Demi-pampleousse	6h56 - 7h04	Machine 0	7h04 - 7h14	Machine 3	-	-	-	-	7h16 - 7h24	Machine 18	0h28	6h56	07h24
14 Demi-pampleousse sans sucre	6h56 - 6h58	Machine 0	6h58 - 7h00	Machine 3	-	-	-	-	7h00 - 7h02	Machine 18	0h06	6h56	07h02
15 Escalope volaille	7h20 - 7h28	Machine 0	-	-	7h28 - 7h48	Machine 16	7h53 - 8h23	Machine 26	7h48 - 7h53	Machine 19	1h03	7h20	08h23
16 Escalope volaille nature	7h20 - 7h21	Machine 0	-	-	7h21 - 7h22	Machine 16	7h23 - 7h53	Machine 26	7h23 - 7h23	Machine 19	0h33	7h20	07h53
17 Sauce Gigot	6h34 - 6h35	Machine 0	-	-	6h35 - 6h45	Machine 6	6h45 - 7h34	Machine 24	7h34 - 7h36	Machine 20	1h02	6h34	07h36
18 Gigot	6h34 - 6h35	Machine 0	6h35 - 6h37	Machine 3	-	-	-	-	6h37 - 6h42	Machine 20	0h08	6h34	06h42
19 Gigot froid	6h34 - 6h35	Machine 0	-	-	6h35 - 6h45	Machine 6	6h45 - 7h34	Machine 24	7h34 - 7h49	Machine 20	1h15	6h34	07h49
20 Gigot nature	6h34 - 6h35	Machine 0	6h35 - 6h37	Machine 3	-	-	-	-	6h37 - 6h42	Machine 20	0h08	6h34	06h42
21 Gougère	7h28 - 7h33	Machine 0	-	-	7h33 - 8h13	Machine 6	8h13 - 8h53	Machine 27	8h53 - 8h59	Machine 19	1h30	7h28	08h58
22 Sauce Haché agneau	6h34 - 6h39	Machine 1 Plan 2	-	-	6h39 - 6h59	Machine 11	6h59 - 7h49	Machine 25	7h53 - 8h04	Machine 19	1h30	6h34	08h04
23 Haché agneau	6h34 - 6h39	Machine 1 Plan 2	-	-	6h39 - 6h59	Machine 11	6h59 - 7h49	Machine 25	7h53 - 8h08	Machine 19	1h00	6h34	07h34
24 Haché agneau nature	6h34 - 6h35	Machine 1 Plan 2	-	-	6h35 - 6h36	Machine 11	-	-	6h36 - 6h37	Machine 19	0h03	6h34	06h37
25 Sauce Haché dinde	6h30 - 6h34	Machine 0	-	-	6h34 - 6h54	Machine 13	6h54 - 7h44	Machine 26	7h44 - 7h50	Machine 20	1h20	6h30	07h50
26 Haché dinde	6h30 - 6h35	Machine 0	-	-	6h35 - 6h45	Machine 13	-	-	6h45 - 6h50	Machine 20	0h20	6h30	06h50
27 Haché poisson	7h14 - 7h15	Machine 1	-	-	7h15 - 7h17	Machine 13	-	-	7h17 - 7h18	Machine 19	0h04	7h14	07h18
28 Sauce duglere	7h14 - 7h19	Machine 1 Plan 2	-	-	7h19 - 7h49	Machine 12	7h49 - 8h39	Machine 21	8h39 - 8h54	Machine 19	1h40	7h14	08h54
29 Haché poisson Sauce duglere	7h14 - 7h19	Machine 1 Plan 2	-	-	7h19 - 7h59	Machine 12	-	-	7h59 - 8h19	Machine 19	1h05	7h14	08h19
30 Haricots verts nature	9h12 - 9h27	Machine 1 Plan 2	-	-	9h27 - 9h47	Machine 5	9h57 - 10h20	Machine 22	9h47 - 9h57	Machine 20	1h08	9h12	10h20
31 Haricots verts sautes	9h12 - 9h27	Machine 1 Plan 2	-	-	9h27 - 9h47	Machine 5	9h57 - 10h42	Machine 22	9h47 - 9h57	Machine 20	1h30	9h12	10h42
32 Jambon blanc	6h30 - 6h34	Machine 1 Plan 2	6h34 - 6h44	Machine 2	-	-	-	-	6h44 - 6h50	Machine 18	0h20	6h30	06h50
33 Jambon blanc nature stsel	6h30 - 6h31	Machine 1	6h31 - 6h32	Machine 2	-	-	-	-	6h32 - 6h33	Machine 18	0h03	6h30	06h33
34 Maquereau vin blanc	7h38 - 7h48	Machine 0	7h48 - 7h58	Machine 3	-	-	-	-	7h58 - 8h03	Machine 18	0h25	7h38	08h03
35 Melon	8h08 - 8h28	Machine 0	8h35 - 9h05	Machine 2	-	-	-	-	9h05 - 9h13	Machine 18	1h05	8h08	09h13
36 Eufs durs	7h04 - 7h09	Machine 1	7h14 - 7h29	Machine 2	-	-	-	-	7h29 - 7h34	Machine 18	0h30	7h04	07h34
37 Eufs mixte vinaigrette	7h19 - 7h20	Machine 0	7h20 - 7h21	Machine 2	-	-	-	-	7h21 - 7h22	Machine 18	0h03	7h19	07h22
38 Eufs nature	6h37 - 6h38	Machine 0	6h38 - 6h40	Machine 2	-	-	-	-	6h40 - 6h42	Machine 18	0h05	6h37	06h42
39 Eufs vinaigrette	6h35 - 6h37	Machine 0	6h37 - 6h42	Machine 3	-	-	-	-	6h42 - 6h46	Machine 18	0h11	6h35	06h46
40 Omelette	7h58 - 8h08	Machine 0	8h08 - 8h23	Machine 3	-	-	-	-	8h23 - 8h33	Machine 18	0h35	7h58	08h33
41 Papillons	12h33 - 12h56	Machine 0	-	-	12h56 - 13h16	Machine 16	13h16 - 13h25	Machine 24	13h25 - 14h21	Machine 19	2h48	12h33	14h21
42 Papillons nature	12h33 - 12h56	Machine 0	-	-	12h56 - 13h16	Machine 16	13h16 - 13h25	Machine 24	13h25 - 14h21	Machine 19	1h48	12h33	14h21
43 Papillons sauce tomate	12h33 - 12h56	Machine 0	-	-	12h55 - 13h16	Machine 16	13h16 - 13h25	Machine 24	13h25 - 14h12	Machine 19	1h39	12h33	14h12
44 Pate de foie	6h53 - 6h56	Machine 0	6h56 - 7h01	Machine 2	-	-	-	-	7h01 - 7h04	Machine 18	0h11	6h53	07h04
45 Pate de foie (mouliné)	6h53 - 6h55	Machine 0	6h55 - 7h00	Machine 2	-	-	-	-	7h00 - 7h02	Machine 18	0h09	6h53	07h02
46 Paupiette veau sauce forestière	9h49 - 10h33	Machine 0	-	-	10h33 - 11h03	Machine 5	12h03 - 13h34	Machine 26	11h03 - 12h03	Machine 20	3h45	9h49	13h34
47 Pavé saumon nature	7h19 - 7h24	Machine 1	-	-	7h24 - 7h39	Machine 4	7h42 - 8h12	Machine 21	7h39 - 7h42	Machine 20	0h53	7h19	08h12
48 Poireaux braises	8h19 - 8h47	Machine 1 Plan 2	-	-	8h47 - 9h17	Machine 4	9h37 - 10h37	Machine 25	9h17 - 9h37	Machine 20	2h18	8h19	10h37
49 Poireaux nature	8h19 - 8h21	Machine 1 Plan 2	-	-	8h21 - 8h51	Machine 4	8h53 - 9h53	Machine 25	8h51 - 8h53	Machine 20	1h34	8h19	09h53
50 Poisson duglere	11h02 - 11h47	Machine 1	11h47 - 12h07	Machine 3	-	-	-	-	13h08 - 13h52	Machine 19	2h50	11h02	13h52
51 Poisson poche	7h39 - 7h44	Machine 1 Plan 2	-	-	8h03 - 8h23	Machine 4	8h34 - 8h49	Machine 22	8h24 - 8h34	Machine 20	1h10	7h39	08h49
52 Poisson poche nature	7h39 - 7h44	Machine 1 Plan 2	-	-	8h03 - 8h23	Machine 4	8h34 - 8h41	Machine 22	8h24 - 8h34	Machine 20	1h02	7h39	08h41
53 Pomme cuite sans sucre	6h54 - 6h59	Machine 1	6h59 - 7h04	Machine 3	-	-	-	-	7h04 - 7h09	Machine 18	0h15	6h54	07h09
54 Pommes de terre vinaigrette	9h13 - 9h28	Machine 0	9h28 - 9h58	Machine 2	-	-	-	-	9h58 - 10h18	Machine 18	1h05	9h13	10h18
55 Pommes vapeur	8h48 - 8h53	Machine 0	8h53 - 8h56	Machine 2	-	-	-	-	8h56 - 8h59	Machine 18	0h11	8h48	08h59
56 Pruneaux	6h39 - 6h44	Machine 1	6h44 - 6h47	Machine 2	-	-	-	-	6h47 - 6h50	Machine 18	0h11	6h39	06h50
57 Purée de carottes	8h57 - 9h12	Machine 1 Plan 2	10h42 - 11h12	Machine 2	-	-	-	-	9h27 - 10h42	Machine 18	2h45	8h57	11h42
58 Purée de jardinière	10h57 - 11h02	Machine 1 Plan 2	11h12 - 11h32	Machine 2	-	-	-	-	11h47 - 12h17	Machine 18	0h50	10h57	11h47
59 Purée de PDT	8h47 - 8h57	Machine 1	8h57 - 9h57	Machine 3	-	-	-	-	10h18 - 10h37	Machine 18	1h50	8h47	10h37
60 Purée de PDT nature	8h47 - 8h49	Machine 1	8h49 - 8h54	Machine 3	-	-	-	-	8h54 - 8h59	Machine 18	0h12	8h47	08h59
61 Riz	9h28 - 9h48	Machine 0	-	-	9h49 - 10h18	Machine 5	10h48 - 12h18	Machine 27	10h18 - 10h48	Machine 20	2h50	9h28	12h18
62 Riz nature	9h28 - 9h33	Machine 0	-	-	9h33 - 10h03	Machine 5	10h05 - 11h35	Machine 27	10h03 - 10h05	Machine 20	2h07	9h28	11h35
63 Sauce Rosbeef	7h33 - 7h38	Machine 0	-	-	7h38 - 7h53	Machine 14	7h55 - 8h45	Machine 24	7h53 - 7h55	Machine 19	1h12	7h33	08h45
64 Rosbeef	7h33 - 7h38	Machine 0	-	-	7h38 - 7h46	Machine 14	-	-	7h46 - 7h51	Machine 19	0h18	7h33	07h51
65 Rosbeef froid nature	7h33 - 7h34	Machine 0	-	-	7h34 - 7h36	Machine 14	-	-	7h36 - 7h37	Machine 19	0h04	7h33	07h37
66 Sauce Roli de veau	6h59 - 7h04	Machine 1	-	-	7h04 - 7h19	Machine 13	7h19 - 8h09	Machine 22	8h09 - 8h14	Machine 19	1h15	6h59	08h14
67 Roli de veau	6h59 - 7h07	Machine 1 Plan 2	-	-	7h07 - 7h36	Machine 13	-	-	7h32 - 7h40	Machine 19	0h41	6h59	07h40
68 Roli de veau nature	6h59 - 7h01	Machine 1	-	-	7h01 - 7h02	Machine 13	-	-	7h06 - 7h08	Machine 19	0h09	6h59	07h08
69 Salade paysanne	6h59 - 8h29	Machine 1 Plan 2	8h29 - 9h14	Machine 2	-	-	-	-	9h14 - 10h14	Machine 19	3h15	6h59	10h14

70	Salade riz nicolis au thon	8h14 - 8h19	Machine 1 Plan 2	8h19 - 8h24	Machine 2 Plan 1	-	-	-	-	8h24 - 8h29	Machine 18 Machine cond. 1	0h15	8h14	08h29
71	Salade verte	7h34 - 7h35	Machine 1 Plan 2	7h35 - 7h36	Machine 3 Plan 2	-	-	-	-	7h36 - 7h37	Machine 18 Machine cond. 1	0h03	7h34	07h37
72	Salade verte nature	7h34 - 7h35	Machine 1 Plan 2	7h35 - 7h36	Machine 3 Plan 2	-	-	-	-	7h36 - 7h37	Machine 18 Machine cond. 1	0h03	7h34	07h37
73	Salade verte VGTTE	7h34 - 7h39	Machine 1 Plan 2	7h39 - 7h44	Machine 3 Plan 2	-	-	-	-	7h44 - 7h52	Machine 18 Machine cond. 1	0h18	7h34	07h52
74	Sauce tomate	6h44 - 6h49	Machine 1 Plan 2	6h49 - 6h54	Machine 2 Plan 1	-	-	-	-	6h54 - 6h56	Machine 18 Machine cond. 1	0h12	6h44	06h56
75	Steak haché	7h09 - 7h14	Machine 1 Plan 2	7h14 - 7h19	Machine 3 Plan 2	-	-	-	-	7h24 - 7h29	Machine 18 Machine cond. 1	0h20	7h09	07h29
76	Steak haché nature	7h09 - 7h10	Machine 1 Plan 2	7h10 - 7h11	Machine 3 Plan 2	-	-	-	-	7h11 - 7h12	Machine 18 Machine cond. 1	0h03	7h09	07h12
77	Tarte aux fraises	9h03 - 9h13	Machine 0 Plan 1	9h38 - 11h18	Machine 2 Plan 1	9h13 - 9h38	Machine 4 Four (GN21)	11h18 - 11h28	Machine 24 Cellule 4	11h28 - 11h43	Machine 18 Machine cond. 1	2h40	9h03	11h43
78	Tarte aux 3 fromages	11h47 - 12h02	Machine 1 Plan 2	13h33 - 14h03	Machine 2 Plan 1	12h03 - 12h33	Machine 5 Four (GN21)	14h17 - 14h33	Machine 18	12h33 - 13h33	Machine 18 Machine cond. 1	3h30	10h47	14h17
79	Terrine de légumes	7h09 - 7h19	Machine 0 Plan 1	7h19 - 8h19	Machine 2 Plan 1	-	-	-	-	8h19 - 8h49	Machine 18 Machine cond. 1	1h40	7h09	08h49
80	Terrine de légumes nature	7h09 - 7h11	Machine 0 Plan 1	7h11 - 7h21	Machine 2 Plan 1	-	-	-	-	7h21 - 7h24	Machine 18 Machine cond. 1	0h15	7h09	07h24
81	Potage	8h15 - 8h48	Machine 0 Plan 1	-	-	8h48 - 11h48	Machine 11 Marmite (400 L)	13h08 - 14h30	Machine 21 Cellule 1	11h48 - 13h08	Machine 19 Machine cond. 2	6h15	8h15	14h30
82	Potage enrichi	7h48 - 7h58	Machine 0 Plan 1	-	-	7h58 - 10h58	Machine 12 Marmite (300 L)	11h28 - 12h38	Machine 21 Cellule 1	10h58 - 11h28	Machine 19 Machine cond. 2	4h50	7h48	12h38

TABLE A. 25 – Planning de production de l’instance présentée dans la Figure A. 24 obtenu avec l’algorithme génétique.

# Bibliographie

- [1] J.-P. Poulain and G. Larrose, *Traité d'ingénierie hôtelière : conception et organisation des hôtels restaurants et collectivités*. LT éditions Jacques Lanore, 1995.
- [2] H. Panetto, B. Iung, D. Ivanov, G. Weichhart, and X. Wang, “Challenges for the cyber-physical manufacturing enterprises of the future,” *Annual Reviews in Control*, vol. 47, pp. 200–213, 2019.
- [3] I. A. Chaudhry and A. A. Khan, “A research survey : review of flexible job shop scheduling techniques,” *International Transactions in Operational Research*, vol. 23, no. 3, pp. 551–591, 2016.
- [4] S. Landry and M. Beaulieu, “La logistique hospitalière : un remède aux maux du secteur de la santé ?” *Gestion*, vol. 26, no. 4, pp. 34–41, 2001.
- [5] S. Benzidia, B. Ageron, O. Bentahar, and J. Husson, “Investigating automation and agv in healthcare logistics : a case study based approach,” *International Journal of Logistics Research and Applications*, vol. 22, no. 3, pp. 273–293, 2019.
- [6] O. Bentahar and S. Benzidia, *Supply chain management de la santé*. Éditions EMS, 2019.
- [7] H. Rickles, “The mysterious case of healthcare logistics,” in *ARHMM Annual Conference, Setting the Standard*, 1999.
- [8] M. Beaulieu and J. Roy, “La chaîne logistique du secteur de la santé : ses coûts et ses économies potentielles,” *Centre sur la productivité et la prospérité (CPP) – Fondation Walter J. Somers, HEC Montréal*, 2019.
- [9] J. Husson, “L’hôpital en quête de performance : perspectives méthodologiques pour un nouveau risk-management hospitalier,” *Gestion 2000*, 2007.
- [10] S. Benzidia, N. Makaoui, and O. Bentahar, “The impact of big data analytics and artificial intelligence on green supply chain process integration and hospital environmental performance,” *Technological Forecasting and Social Change*, vol. 165, p. 120557, 2021.

- [11] M. Beaulieu and O. Bentahar, “Digitalization of the healthcare supply chain : A roadmap to generate benefits and effectively support healthcare delivery,” *Technological Forecasting and Social Change*, vol. 167, p. 120717, 2021.
- [12] M. Cremadez and F. Grateau, *Le management stratégique hospitalier*. InterEd. Masson 2e Ed, 1997.
- [13] S. Landry, M. Beaulieu, T. Friel, and C. R. Duguay, “Étude internationale des meilleures pratiques de logistique hospitalière,” 2000.
- [14] J.-P. Blouin, M. Beaulieu, and S. Landry, “La performance des modes de réapprovisionnement des fournitures médicales,” *Cahier de recherche- Ecole des hautes études commerciales, Montréal, Québec*, 2000.
- [15] N. Sampieri-Teissier, “Enjeux et limites d’une amélioration des pratiques logistiques dans les hôpitaux publics français,” *Logistique & Management*, vol. 12, no. sup1, pp. 31–39, 2004.
- [16] A. Mucchielli, “La crise interne des hôpitaux : un outil d’évaluation de son importance,” *Gestions hospitalières*, no. 324, 1993.
- [17] C. Cauvin, “Établissements de santé : spécificité de la gestion et particularité du management. 2 éd,” *Paris : Economica*, 1997.
- [18] C. D. Naylor, “Health care in canada : Incrementalism under fiscal duress : Fiscal constraints have eroded canadians’ enthusiasm about their single-payer system, but their commitment to universal coverage is holding firm.” *Health affairs*, vol. 18, no. 3, pp. 9–26, 1999.
- [19] M. Beaulieu and S. Landry, “Comment gérer la logistique hospitalière ? deux pays, deux réalités,” *Gestion*, vol. 27, no. 3, pp. 91–98, 2002.
- [20] D. Fixari and D. Tonneau, “La modernisation par recours aux mécanismes type marché : des effets à découvrir par une évaluation-apprentissage. le cas des nouveaux outils de gestion hospitalière,” *Politiques et Management Public*, vol. 11, no. 2, pp. 93–115, 1993.
- [21] A. Ruiz Bartolomé, “Logistique de la distribution dans le secteur de la santé,” Ph.D. dissertation, Compiègne, 2002.
- [22] V. Bonniol, S. Chambaretaud, O. Chanel, L.-A. Gerard-Varet, L. Hartmann, A. Leroux, K. Moschetti, M. Mougeot, F. Naegelen *et al.*, “Efficacité de la dépense publique en matière de santé-cohérence des instruments de régulation-rapport scientifique,” *Tech. Rep.*, 1999.
- [23] G. Gasquet, “L’hôpital poursuit son évolution logistique,” *Techniques hospitalières*, vol. 59, no. 687, pp. 23–26, 2004.
- [24] J. Thévenin, “Logistique hospitalière en france : études de cas,” Ph.D. dissertation, 2000.

- 
- [25] J.-P. Detrie, "Stratégor, politique générale de l'entreprise," 3<sup>e</sup> édition, Dunod, Paris, p. 551, 1993.
- [26] W. Henning, "The financial impact of materials management," *Hospital financial management*, vol. 34, no. 2, pp. 36–42, 1980.
- [27] J. C. Kowalski, "Materials management crucial to overall efficiency." *Healthcare financial management : journal of the Healthcare Financial Management Association*, vol. 45, no. 1, pp. 40–42, 1991.
- [28] B. Bourgeon, A. Constantin, G. Karolszyk, J.-F. Marquot, S. Pedrini, S. Landry, A. Diaz, and D. Estampe, "Evaluation des coûts logistiques hospitaliers en France et aux Pays-Bas," *Logistique & Management*, vol. 9, no. 1, pp. 81–87, 2001.
- [29] G. Chow, T. D. Heaver, and L. E. Henriksson, "Logistics performance : definition and measurement," *International journal of physical distribution & logistics management*, 1994.
- [30] R. N. Davis, "No more chances for supply-chain savings? look again! many hospitals assume they have exhausted opportunities to reduce supply-chain costs. but a well-coordinated, interdisciplinary effort may still yield substantial savings," *Healthcare Financial Management*, vol. 58, no. 1, pp. 68–76, 2004.
- [31] C. Cosson, *Sécurité et vigilance alimentaires à l'hôpital*. Éd. de l'École nationale de la santé publique, 2002.
- [32] M. Maslarić, S. Nikolić, and D. Mirčetić, "Logistics response to the industry 4.0 : the physical internet," *Open engineering*, vol. 6, no. 1, 2016.
- [33] K.-I. Müller, Julian M et Voigt, "The impact of industry 4.0 on supply chains in engineer-to-order industries-an exploratory case study," *IFAC-PapersOnLine*, vol. 51, no. 11, pp. 122–127, 2018.
- [34] I. J. Timm and F. Lorig, "Logistics 4.0-a challenge for simulation," in *2015 Winter Simulation Conference (WSC)*. IEEE, 2015, pp. 3118–3119.
- [35] L. Barreto, A. Amaral, and T. Pereira, "Industry 4.0 implications in logistics : an overview," *Procedia Manufacturing*, vol. 13, pp. 1245–1252, 2017.
- [36] A. Jäger and F. Ranz, "Industry 4.0 : challenges for the human factor in future production scenarios," 2015.
- [37] A. Mital and A. Pennathur, "Advanced technologies and humans in manufacturing workplaces : an interdependent relationship," *International journal of industrial ergonomics*, vol. 33, no. 4, pp. 295–313, 2004.



- [38] J. W. Strandhagen, E. Alfnes, J. O. Strandhagen, and L. R. Vallandingham, “The fit of industry 4.0 applications in manufacturing logistics : a multiple case study,” *Advances in Manufacturing*, vol. 5, no. 4, pp. 344–358, 2017.
- [39] F. Nilsson, “Logistics management in practice—towards theories of complex logistics,” *The International Journal of Logistics Management*, 2006.
- [40] A. G. Bruzzone, E. Briano, E. Bocca, and M. Massei, “Evaluation of the impact of different human factor models on industrial and business processes,” *Simulation Modelling Practice and Theory*, vol. 15, no. 2, pp. 199–218, 2007.
- [41] R. De Koster, T. Le-Duc, and K. J. Roodbergen, “Design and control of warehouse order picking : A literature review,” *European journal of operational research*, vol. 182, no. 2, pp. 481–501, 2007.
- [42] E. H. Grosse, C. H. Glock, M. Y. Jaber, and W. P. Neumann, “Incorporating human factors in order picking planning models : framework and research opportunities,” *International Journal of Production Research*, vol. 53, no. 3, pp. 695–717, 2015.
- [43] E. H. Grosse, C. H. Glock, and W. P. Neumann, “Human factors in order picking : a content analysis of the literature,” *International Journal of Production Research*, vol. 55, no. 5, pp. 1260–1276, 2017.
- [44] D. Battini, M. Faccio, A. Persona, and F. Sgarbossa, “New methodological framework to improve productivity and ergonomics in assembly system design,” *International Journal of industrial ergonomics*, vol. 41, no. 1, pp. 30–42, 2011.
- [45] D. Battini, X. Delorme, A. Dolgui, and F. Sgarbossa, “Assembly line balancing with ergonomics paradigms : two alternative methods,” *IFAC-PapersOnLine*, vol. 48, no. 3, pp. 586–591, 2015.
- [46] Z. Givi, M. Y. Jaber, and W. P. Neumann, “Modelling worker reliability with learning and fatigue,” *Applied Mathematical Modelling*, vol. 39, no. 17, pp. 5186–5199, 2015.
- [47] E. H. Grosse and C. H. Glock, “The effect of worker learning on manual order picking processes,” *International Journal of Production Economics*, vol. 170, pp. 882–890, 2015.
- [48] D. Battini, M. Calzavara, A. Otto, and F. Sgarbossa, “Preventing ergonomic risks with integrated planning on assembly line balancing and parts feeding,” *International Journal of Production Research*, vol. 55, no. 24, pp. 7452–7472, 2017.
- [49] M. Calzavara, C. H. Glock, E. H. Grosse, and F. Sgarbossa, “An integrated storage assignment method for manual order picking warehouses considering cost, workload and posture,” *International Journal of Production Research*, vol. 57, no. 8, pp. 2392–2408, 2019.

- 
- [50] S. Finco, D. Battini, X. Delorme, A. Persona, and F. Sgarbossa, “Workers’ rest allowance and smoothing of the workload in assembly lines,” *International Journal of Production Research*, vol. 58, no. 4, pp. 1255–1270, 2020.
- [51] D. Ivanov, S. Sethi, A. Dolgui, and B. Sokolov, “A survey on control theory applications to operational systems, supply chain management, and industry 4.0,” *Annual Reviews in Control*, vol. 46, pp. 134–147, 2018.
- [52] M. Calzavara, D. Battini, D. Bogataj, F. Sgarbossa, and I. Zennaro, “Ageing workforce management in manufacturing systems : state of the art and future research agenda,” *International Journal of Production Research*, vol. 58, no. 3, pp. 729–747, 2020.
- [53] F. Sgarbossa, E. H. Grosse, W. P. Neumann, D. Battini, and C. H. Glock, “Human factors in production and logistics systems of the future,” *Annual Reviews in Control*, 2020.
- [54] M. E. Falagas, E. I. Pitsouni, G. A. Malietzis, and G. Pappas, “Comparison of pubmed, scopus, web of science, and google scholar : strengths and weaknesses,” *The FASEB journal*, vol. 22, no. 2, pp. 338–342, 2008.
- [55] N. J. v. Eck and L. Waltman, “How to normalize cooccurrence data? an analysis of some well-known similarity measures,” *Journal of the American society for information science and technology*, vol. 60, no. 8, pp. 1635–1651, 2009.
- [56] I. Gräßler, D. Roesmann, and J. Pottebaum, “Model based integration of human characteristics in production systems : a literature survey,” *Procedia CIRP*, vol. 99, pp. 57–62, 2021.
- [57] J. C. Chen, Y.-Y. Chen, T.-L. Chen, and Y.-H. Kuo, “Applying two-phase adaptive genetic algorithm to solve multi-model assembly line balancing problems in tft–lcd module process,” *Journal of Manufacturing Systems*, vol. 52, pp. 86–99, 2019.
- [58] D. Kim, D. H. Moon, and I. Moon, “Balancing a mixed-model assembly line with unskilled temporary workers : algorithm and case study,” *Assembly Automation*, 2018.
- [59] G. Gong, Q. Deng, X. Gong, W. Liu, and Q. Ren, “A new double flexible job-shop scheduling problem integrating processing time, green production, and human factor indicators,” *Journal of cleaner production*, vol. 174, pp. 560–576, 2018.
- [60] M. Liu and X. Yang, “Bi-objective optimization for scheduling and multi-skilled worker assignments in the hybrid flow shop,” *IFAC-PapersOnLine*, vol. 52, no. 13, pp. 2128–2133, 2019.
- [61] S. Moussavi, M. Mahdjoub, and O. Grunder, “A multi-objective programming approach to develop an ergonomic job rotation in a manufacturing system,” *IFAC-PapersOnLine*, vol. 51, no. 11, pp. 850–855, 2018.

- [62] S. Digiesi, F. Facchini, G. Mossa, and G. Mummolo, "Minimizing and balancing ergonomic risk of workers of an assembly line by job rotation : A minlp model," *International Journal of Industrial Engineering and Management*, vol. 9, no. 3, pp. 129–138, 2018.
- [63] B. Efe, G. E. O. Kremer, and M. Kurt, "Age and gender-based workload constraint for assembly line worker assignment and balancing problem in a textile firm." *International Journal of Industrial Engineering*, vol. 25, no. 1, 2018.
- [64] K. Messing, M. Lefrançois, and J. Saint-Charles, "Observing inequality : Can ergonomic observations help interventions transform the role of gender in work activity ?" *Computer Supported Cooperative Work (CSCW)*, pp. 1–35, 2018.
- [65] P. Hirsch, I. Koch, and J. Karbach, "Putting a stereotype to the test : The case of gender differences in multitasking costs in task-switching and dual-task situations," *PloS one*, vol. 14, no. 8, p. e0220150, 2019.
- [66] Y.-C. Lee, C.-H. Chen, and C.-H. Lee, "Body anthropometric measurements of singaporean adult and elderly population," *Measurement*, vol. 148, p. 106949, 2019.
- [67] S. Finco, I. Zennaro, D. Battini, and A. Persona, "Workers' availability definition through the energy expenditure evaluation," in *Proceedings-25th ISSAT International Conference on Reliability and Quality in Design*, 2019, pp. 1–3.
- [68] M. Dalle Mura and G. Dini, "Optimizing ergonomics in assembly lines : A multi objective genetic algorithm," *Cirp Journal of Manufacturing Science and Technology*, vol. 27, pp. 31–45, 2019.
- [69] E. D. Gunes, "Workforce scheduling," 1999.
- [70] H. K. Alfares, "Optimum workforce scheduling under the (14, 21) days-off timetable," *Journal of applied mathematics and decision sciences*, vol. 6, no. 3, pp. 191–199, 2002.
- [71] M. Elshafei and H. K. Alfares, "A dynamic programming algorithm for days-off scheduling with sequence dependent labor costs," *Journal of Scheduling*, vol. 11, no. 2, pp. 85–93, 2008.
- [72] S. U. Seçkiner and M. Kurt, "Ant colony optimization for the job rotation scheduling problem," *Applied Mathematics and Computation*, vol. 201, no. 1-2, pp. 149–160, 2008.
- [73] G. Michalos, S. Makris, L. Rentzos, and G. Chryssolouris, "Dynamic job rotation for workload balancing in human based assembly systems," *CIRP Journal of Manufacturing Science and Technology*, vol. 2, no. 3, pp. 153–160, 2010.
- [74] A. M. Costa and C. Miralles, "Job rotation in assembly lines employing disabled workers," *International Journal of Production Economics*, vol. 120, no. 2, pp. 625–632, 2009.

- 
- [75] M. Othman, G. J. Gouw, and N. Bhuiyan, "Workforce scheduling : A new model incorporating human factors," *Journal of Industrial Engineering and Management (JIEM)*, vol. 5, no. 2, pp. 259–284, 2012.
- [76] M. C. O. Moreira and A. M. Costa, "Hybrid heuristics for planning job rotation schedules in assembly lines with heterogeneous workers," *International Journal of Production Economics*, vol. 141, no. 2, pp. 552–560, 2013.
- [77] T. Rattanamanee and S. Nanthavanij, "Multi-workday ergonomic workforce scheduling with days off," in *Proceedings of the 4th International Conference on Engineering, Project, and Production management (EPPM)*, vol. 4, 2013, pp. 1117–1125.
- [78] A. Otto and A. Scholl, "Reducing ergonomic risks by job rotation scheduling," *OR spectrum*, vol. 35, no. 3, pp. 711–733, 2013.
- [79] N. Azizi, S. Zolfaghari, and M. Liang, "Modeling job rotation in manufacturing systems : The study of employee's boredom and skill variations," *International Journal of Production Economics*, vol. 123, no. 1, pp. 69–85, 2010.
- [80] S.-H. Huang and Y.-C. Pan, "Ergonomic job rotation strategy based on an automated rgb-d anthropometric measuring system," *Journal of Manufacturing Systems*, vol. 33, no. 4, pp. 699–710, 2014.
- [81] J. Van den Bergh, J. Beliën, P. De Bruecker, E. Demeulemeester, and L. De Boeck, "Personnel scheduling : A literature review," *European journal of operational research*, vol. 226, no. 3, pp. 367–385, 2013.
- [82] O. Guschinskaya and A. Dolgui, "Equilibrage de lignes de production. etat de l'art," *Journal Europeen des Systemes Automatises-JESA-APII*, vol. 44, no. 9, p. 1079, 2010.
- [83] D. Battini, M. Calzavara, A. Otto, and F. Sgarbossa, "The integrated assembly line balancing and parts feeding problem with ergonomics considerations," *IFAC-PapersOnLine*, vol. 49, no. 12, pp. 191–196, 2016.
- [84] S.-E. Moussavi, M. Mahdjoub, and O. Grunder, "Productivity improvement through a sequencing generalised assignment in an assembly line system," *International Journal of Production Research*, vol. 55, no. 24, pp. 7509–7523, 2017.
- [85] S. Moussavi, M. Mahdjoub, and O. Grunder, "A hybrid heuristic algorithm for the sequencing generalized assignment problem in an assembly line," *IFAC-PapersOnLine*, vol. 51, no. 2, pp. 695–700, 2018.
- [86] F. Sgarbossa, D. Battini, A. Persona, and V. Visentin, "Including ergonomics aspects into mixed-model assembly line balancing problem," in *Advances in physical ergonomics and human factors*. Springer, 2016, pp. 991–1001.

- [87] D. Battini, X. Delorme, A. Dolgui, A. Persona, and F. Sgarbossa, “Ergonomics in assembly line balancing based on energy expenditure : a multi-objective model,” *International Journal of Production Research*, vol. 54, no. 3, pp. 824–845, 2016.
- [88] C. Miralles, J. P. Garcia-Sabater, C. Andres, and M. Cardos, “Advantages of assembly lines in sheltered work centres for disabled. a case study,” *International Journal of Production Economics*, vol. 110, no. 1-2, pp. 187–197, 2007.
- [89] M. Vila and J. Pereira, “A branch-and-bound algorithm for assembly line worker assignment and balancing problems,” *Computers & Operations Research*, vol. 44, pp. 105–114, 2014.
- [90] P. T. Zacharia and A. C. Nearchou, “A population-based algorithm for the bi-objective assembly line worker assignment and balancing problem,” *Engineering Applications of Artificial Intelligence*, vol. 49, pp. 1–9, 2016.
- [91] N. Manavizadeh, N.-s. Hosseini, M. Rabbani, and F. Jolai, “A simulated annealing algorithm for a mixed model assembly u-line balancing type-i problem considering human efficiency and just-in-time approach,” *Computers & industrial engineering*, vol. 64, no. 2, pp. 669–685, 2013.
- [92] P. M. Cortez and A. M. Costa, “Sequencing mixed-model assembly lines operating with a heterogeneous workforce,” *International Journal of Production Research*, vol. 53, no. 11, pp. 3419–3432, 2015.
- [93] A. Roshani and D. Giglio, “Simulated annealing algorithms for the multi-manned assembly line balancing problem : minimising cycle time,” *International Journal of Production Research*, vol. 55, no. 10, pp. 2731–2751, 2017.
- [94] W.-C. Chiang, T. L. Urban, and C. Luo, “Balancing stochastic two-sided assembly lines,” *International Journal of Production Research*, vol. 54, no. 20, pp. 6232–6250, 2016.
- [95] L. Zeltzer, E.-H. Aghezzaf, and V. Limère, “Workload balancing and manufacturing complexity levelling in mixed-model assembly lines,” *International Journal of Production Research*, vol. 55, no. 10, pp. 2829–2844, 2017.
- [96] M.-È. Chiasson, D. Imbeau, K. Aubry, and A. Delisle, “Comparing the results of eight methods used to evaluate risk factors associated with musculoskeletal disorders,” *International Journal of Industrial Ergonomics*, vol. 42, no. 5, pp. 478–488, 2012.
- [97] E. M. Speklé, J. Heinrich, M. J. Hoozemans, B. M. Blatter, A. J. van der Beek, J. H. van Dieën, and M. W. van Tulder, “The cost-effectiveness of the rsi quickscan intervention programme for computer workers : results of an economic evaluation alongside a randomised controlled trial,” *BMC musculoskeletal disorders*, vol. 11, no. 1, pp. 1–13, 2010.

- 
- [98] S. Rivière, E. Penven, H. Cadéac-Birman, Y. Roquelaure, and M. Valenty, “Underreporting of musculoskeletal disorders in 10 regions in France in 2009,” *American journal of industrial medicine*, vol. 57, no. 10, pp. 1174–1180, 2014.
- [99] Y. Roquelaure, C. Ha, A. Leclerc, A. Touranchet, M. Sauteron, M. Melchior, E. Imbernon, and M. Goldberg, “Epidemiologic surveillance of upper-extremity musculoskeletal disorders in the working population,” *Arthritis Care & Research : Official Journal of the American College of Rheumatology*, vol. 55, no. 5, pp. 765–778, 2006.
- [100] A.-C. Falck, R. Örtengren, and M. Rosenqvist, “Assembly failures and action cost in relation to complexity level and assembly ergonomics in manual assembly (part 2),” *International Journal of Industrial Ergonomics*, vol. 44, no. 3, pp. 455–459, 2014.
- [101] C. Berlin, R. Örtengren, D. Lämkkull, and L. Hanson, “Corporate-internal vs. national standard—a comparison study of two ergonomics evaluation procedures used in automotive manufacturing,” *International Journal of Industrial Ergonomics*, vol. 39, no. 6, pp. 940–946, 2009.
- [102] J. Côté, S. Ngomo, S. Stock, K. Messing, N. Vézina, D. Antle, A. Delisle, M. Bellemare, M. Laberge, and M. St-Vincent, “Quebec research on work-related musculoskeletal disorders : Deeper understanding for better prevention,” *Relations industrielles/industrial relations*, vol. 68, no. 4, pp. 643–660, 2013.
- [103] J. R. Fuller, K. V. Lomond, J. Fung, and J. N. Côté, “Posture-movement changes following repetitive motion-induced shoulder muscle fatigue,” *Journal of Electromyography and Kinesiology*, vol. 19, no. 6, pp. 1043–1052, 2009.
- [104] B. Widanarko, S. Legg, J. Devereux, and M. Stevenson, “Interaction between physical and psychosocial risk factors on the presence of neck/shoulder symptoms and its consequences,” *Ergonomics*, vol. 58, no. 9, pp. 1507–1518, 2015.
- [105] N. Fallentin, Å. Kilbom, E. Viikari-Juntura, and M. Wærsted, “Evaluation of physical workload standards/guidelines from a nordic perspective,” in *Proceedings of the Human Factors and Ergonomics Society Annual Meeting*, vol. 44, no. 35. SAGE Publications Sage CA : Los Angeles, CA, 2000, pp. 6–429.
- [106] R. Wells, S. E. Mathiassen, L. Medbo, and J. Winkel, “Time—a key issue for musculoskeletal health and manufacturing,” *Applied Ergonomics*, vol. 38, no. 6, pp. 733–744, 2007.
- [107] S. E. Mathiassen, “Diversity and variation in biomechanical exposure : what is it, and why would we like to know ?” *Applied ergonomics*, vol. 37, no. 4, pp. 419–427, 2006.
- [108] R. S. Padula, M. L. C. Comper, E. H. Sparer, and J. T. Dennerlein, “Job rotation designed to prevent musculoskeletal disorders and control risk in manufacturing industries : A systematic review,” *Applied ergonomics*, vol. 58, pp. 386–397, 2017.

- [109] B. Jonsson, "Electromyographic studies of job rotation," *Scandinavian journal of work, environment & health*, vol. 14, pp. 108–109, 1988.
- [110] I. Balogh, K. Ohlsson, G.-Å. Hansson, T. Engström, and S. Skerfving, "Increasing the degree of automation in a production system : consequences for the physical workload," *International journal of industrial ergonomics*, vol. 36, no. 4, pp. 353–365, 2006.
- [111] S. Asensio-Cuesta, J. A. Diego-Mas, L. V. Cremades-Oliver, and M.-C. González-Cruz, "A method to design job rotation schedules to prevent work-related musculoskeletal disorders in repetitive work," *International Journal of Production Research*, vol. 50, no. 24, pp. 7467–7478, 2012.
- [112] A. Otto and A. Scholl, "Incorporating ergonomic risks into assembly line balancing," *European Journal of Operational Research*, vol. 212, no. 2, pp. 277–286, 2011.
- [113] D. D. Triggs and P. M. King, "Job rotation," *Professional safety*, vol. 45, no. 2, p. 32, 2000.
- [114] S.-Y. Yoon, J. Ko, and M.-C. Jung, "A model for developing job rotation schedules that eliminate sequential high workloads and minimize between-worker variability in cumulative daily workloads : Application to automotive assembly lines," *Applied ergonomics*, vol. 55, pp. 8–15, 2016.
- [115] M. Frazer, R. Norman, R. Wells, and P. Neumann, "The effects of job rotation on the risk of reporting low back pain," *Ergonomics*, vol. 46, no. 9, pp. 904–919, 2003.
- [116] P. C. Leider, J. S. Boschman, M. H. Frings-Dresen, and H. F. van der Molen, "When is job rotation perceived useful and easy to use to prevent work-related musculoskeletal complaints ?" *Applied ergonomics*, vol. 51, pp. 205–210, 2015.
- [117] M. Aptel, F. Cail, A. Gerling, and O. Louis, "Proposal of parameters to implement a workstation rotation system to protect against msds," *International Journal of Industrial Ergonomics*, vol. 38, no. 11-12, pp. 900–909, 2008.
- [118] T. De Oliveira Sato and H. J. C. G. Coury, "Evaluation of musculoskeletal health outcomes in the context of job rotation and multifunctional jobs," *Applied ergonomics*, vol. 40, no. 4, pp. 707–712, 2009.
- [119] S. Moussavi, M. Mahdjoub, and O. Grunder, "Reducing production cycle time by ergonomic workforce scheduling," *IFAC-PapersOnLine*, vol. 49, no. 12, pp. 419–424, 2016.
- [120] E. H. Grosse, M. Calzavara, C. H. Glock, and F. Sgarbossa, "Incorporating human factors into decision support models for production and logistics : current state of research," *IFAC-PapersOnLine*, vol. 50, no. 1, pp. 6900–6905, 2017.

- [121] L. Botti, C. Mora, and M. Calzavara, “Design of job rotation schedules managing the exposure to age-related risk factors,” *IFAC-PapersOnLine*, vol. 50, no. 1, pp. 13 993–13 997, 2017.
- [122] D. Rossi, E. Bertoloni, M. Fenaroli, F. Marciano, and M. Alberti, “A multi-criteria ergonomic and performance methodology for evaluating alternatives in “manuable” material handling,” *International Journal of Industrial Ergonomics*, vol. 43, no. 4, pp. 314–327, 2013.
- [123] J. A. Diego-Mas, S. Asensio-Cuesta, M. Sanchez-Romero, and M. Artacho-Ramirez, “A multi-criteria genetic algorithm for the generation of job rotation schedules,” *International journal of industrial ergonomics*, vol. 39, no. 1, pp. 23–33, 2009.
- [124] M. S. Hussin and T. Stützle, “Hybrid simulated annealing for the bi-objective quadratic assignment problem,” in *International Workshop on Multi-disciplinary Trends in Artificial Intelligence*. Springer, 2017, pp. 462–472.
- [125] F. Niakan, A. Baboli, T. Moyaux, and V. Botta-Genoulaz, “A multi-objective mathematical model considering economic and social criteria in dynamic cell formation,” in *IFIP International Conference on Advances in Production Management Systems*. Springer, 2014, pp. 46–53.
- [126] S. D. Akyol and A. Baykasoğlu, “Ergoalwbp : a multiple-rule based constructive randomized search algorithm for solving assembly line worker assignment and balancing problem under ergonomic risk factors,” *Journal of Intelligent Manufacturing*, vol. 30, no. 1, pp. 291–302, 2016.
- [127] K. Li, S. Xu, and H. Fu, “Work-break scheduling with real-time fatigue effect and recovery,” *International Journal of Production Research*, vol. 58, no. 3, pp. 689–702, 2020.
- [128] S. Moussavi, M. Zare, M. Mahdjoub, and O. Grunder, “Balancing high operator’s workload through a new job rotation approach : Application to an automotive assembly line,” *International Journal of Industrial Ergonomics*, vol. 71, pp. 136–144, 2019.
- [129] S. E. Moussavi, “Workforce scheduling and job rotation by considering ergonomic factors (presentation of the sequencing generalized assignment problem) : application to production and home healthcare systems,” Ph.D. dissertation, Université Bourgogne Franche-Comté, 2018.
- [130] A. J. Ruiz-Torres, J. H. Ablanedo-Rosas, S. Mukhopadhyay, and G. Paletta, “Scheduling workers : A multi-criteria model considering their satisfaction,” *Computers & Industrial Engineering*, vol. 128, pp. 747–754, 2019.
- [131] A. Shuib and F. I. Kamarudin, “Solving shift scheduling problem with days-off preference for power station workers using binary integer goal programming model,” *Annals of Operations Research*, vol. 272, no. 1-2, pp. 355–372, 2019.



- [132] S. Ağralı, Z. C. Taşkın, and A. T. Ünal, “Employee scheduling in service industries with flexible employee availability and demand,” *Omega*, vol. 66, pp. 159–169, 2017.
- [133] B. Sungur, C. Özgüven, and Y. Kariper, “Shift scheduling with break windows, ideal break periods, and ideal waiting times,” *Flexible Services and Manufacturing Journal*, vol. 29, no. 2, pp. 203–222, 2017.
- [134] T.-C. Wang and C.-C. Liu, “Optimal work shift scheduling with fatigue minimization and day off preferences,” *Mathematical Problems in Engineering*, vol. 2014, 2014.
- [135] M. Eid, H. Al Osman, and A. El Saddik, “A mathematical model for personalized relaxation for stress management,” in *2013 IEEE International Symposium on Medical Measurements and Applications (MeMeA)*. IEEE, 2013, pp. 201–206.
- [136] M. Akbari, M. Zandieh, and B. Dorri, “Scheduling part-time and mixed-skilled workers to maximize employee satisfaction,” *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, vol. 64, no. 5, pp. 1017–1027, 2013.
- [137] S. Mohan, “Scheduling part-time personnel with availability restrictions and preferences to maximize employee satisfaction,” *Mathematical and Computer Modelling*, vol. 48, no. 11-12, pp. 1806–1813, 2008.
- [138] X. Sun, J. S. Noble, and C. M. Klein, “Single-machine scheduling with sequence dependent setup to minimize total weighted squared tardiness,” *IIE transactions*, vol. 31, no. 2, pp. 113–124, 1999.
- [139] W. Wei, P. Amorim, L. Guimarães, and B. Almada-Lobo, “Tackling perishability in multi-level process industries,” *International Journal of Production Research*, vol. 57, no. 17, pp. 5604–5623, 2019.
- [140] F. Z. Sargut and G. Işık, “Dynamic economic lot size model with perishable inventory and capacity constraints,” *Applied Mathematical Modelling*, vol. 48, pp. 806–820, 2017.
- [141] K. Copil, M. Wörbelauer, H. Meyr, and H. Tempelmeier, “Simultaneous lotsizing and scheduling problems : a classification and review of models,” *OR spectrum*, vol. 39, no. 1, pp. 1–64, 2017.
- [142] B. Stefansdottir, M. Grunow, and R. Akkerman, “Classifying and modeling setups and cleanings in lot sizing and scheduling,” *European Journal of Operational Research*, vol. 261, no. 3, pp. 849–865, 2017.
- [143] A. Acevedo-Ojeda, I. Contreras, and M. Chen, “Two-level lot-sizing with raw-material perishability and deterioration,” *Journal of the Operational Research Society*, vol. 71, no. 3, pp. 417–432, 2015.

- 
- [144] B. Bilgen and Y. Çelebi, “Integrated production scheduling and distribution planning in dairy supply chain by hybrid modelling,” *Annals of Operations Research*, vol. 211, no. 1, pp. 55–82, 2013.
- [145] G. M. Kopanos, L. Puigjaner, and M. C. Georgiadis, “Efficient mathematical frameworks for detailed production scheduling in food processing industries,” *Computers & chemical engineering*, vol. 42, pp. 206–216, 2012.
- [146] O. A. Kılıç, “Planning and scheduling in process industries considering industry-specific characteristics,” 2011.
- [147] A. Karray, M. Benrejeb, and P. Borne, “New parallel genetic algorithms for the single-machine scheduling problems in agro-food industry,” in *2011 International Conference on Communications, Computing and Control Applications (CCCA)*. IEEE, 2011, pp. 1–7.
- [148] M. C. Georgiadis, G. Kopanos, and L. Puigjaner Corbella, “Optimal production scheduling and lot-sizing in dairy plants : the yogurt production line,” 2010.
- [149] H.-O. Günther, P. van Beek, M. Grunow, M. L. Entrup, and S. Zhang, “An milp modelling approach for shelf life integrated planning and scheduling in scalded sausage production,” in *Perspectives on Operations Research*. Springer, 2006, pp. 163–188.
- [150] M. Lütke Entrup, H.-O. Günther, P. Van Beek, M. Grunow, and T. Seiler, “Mixed-integer linear programming approaches to shelf-life-integrated planning and scheduling in yoghurt production,” *International journal of production research*, vol. 43, no. 23, pp. 5071–5100, 2005.
- [151] P. Doganis and H. Sarimveis, “Optimal scheduling in a yogurt production line based on mixed integer linear programming,” *Journal of Food Engineering*, vol. 80, no. 2, pp. 445–453, 2007.
- [152] P. Doganis and H. Sarimveis, “Optimal production scheduling for the dairy industry,” *Annals of Operations Research*, vol. 159, no. 1, pp. 315–331, 2008.
- [153] R. Akkerman and D. P. van Donk, “Analyzing scheduling in the food-processing industry : structure and tasks,” *Cognition, Technology & Work*, vol. 11, no. 3, pp. 215–226, 2009.
- [154] V. Smith-Daniels and L. P. Ritzman, “A model for lot sizing and sequencing in process industries,” *The International Journal of Production Research*, vol. 26, no. 4, pp. 647–674, 1988.
- [155] T. Wauters, K. Verbeeck, P. Verstraete, G. V. Berghe, and P. De Causmaecker, “Real-world production scheduling for the food industry : An integrated approach,” *Engineering Applications of Artificial Intelligence*, vol. 25, no. 2, pp. 222–228, 2012.
- [156] A. Acevedo-Ojeda, I. Contreras, and M. Chen, “Two-level lot-sizing with raw-material perishability and deterioration,” *Journal of the Operational Research Society*, vol. 71, no. 3, pp. 417–432, 2020.

- [157] M. K. Niaki, F. Nonino, A. R. Komijan, and M. Dehghani, "Food production in batch manufacturing systems with multiple shared-common resources : a scheduling model and its application in the yoghurt industry," *International Journal of Services and Operations Management*, vol. 27, no. 3, pp. 345–365, 2017.
- [158] O. Ahumada and J. R. Villalobos, "Application of planning models in the agri-food supply chain : A review," *European journal of Operational research*, vol. 196, no. 1, pp. 1–20, 2009.
- [159] C. Sel, B. Bilgen, J. Bloemhof-Ruwaard, and J. G. van der Vorst, "Multi-bucket optimization for integrated planning and scheduling in the perishable dairy supply chain," *Computers & chemical engineering*, vol. 77, pp. 59–73, 2015.
- [160] C. Arbib, D. Pacciarelli, and S. Smriglio, "A three-dimensional matching model for perishable production scheduling," *Discrete Applied Mathematics*, vol. 92, no. 1, pp. 1–15, 1999.
- [161] C. Basnet, L. R. Foulds, and J. M. Wilson, "An exact algorithm for a milk tanker scheduling and sequencing problem," *Annals of Operations Research*, vol. 86, pp. 559–568, 1999.
- [162] S. Chen, R. Berretta, A. Clark, and P. Moscato, "Lot sizing and scheduling for perishable food products : A review," 2019.
- [163] J. Liu and B. L. MacCarthy, "A global milp model for fms scheduling," *European journal of operational research*, vol. 100, no. 3, pp. 441–453, 1997.
- [164] K. F. Guimaraes and M. A. Fernandes, "An approach for flexible job-shop scheduling with separable sequence-dependent setup time," in *2006 IEEE International Conference on Systems, Man and Cybernetics*, vol. 5. IEEE, 2006, pp. 3727–3731.
- [165] M. Saidi-Mehrabad and P. Fattahi, "Flexible job shop scheduling with tabu search algorithms," *The international journal of Advanced Manufacturing technology*, vol. 32, no. 5-6, pp. 563–570, 2007.
- [166] F. M. Defersha and M. Chen, "A parallel genetic algorithm for a flexible job-shop scheduling problem with sequence dependent setups," *The international journal of advanced manufacturing technology*, vol. 49, no. 1, pp. 263–279, 2010.
- [167] Y. Mati, C. Lahlou, and S. Dauzere-Peres, "Modelling and solving a practical flexible job-shop scheduling problem with blocking constraints," *International Journal of Production Research*, vol. 49, no. 8, pp. 2169–2182, 2011.
- [168] A. Bagheri and M. Zandieh, "Bi-criteria flexible job-shop scheduling with sequence-dependent setup times—variable neighborhood search approach," *Journal of Manufacturing Systems*, vol. 30, no. 1, pp. 8–15, 2011.

- [169] M. Mousakhani, "Sequence-dependent setup time flexible job shop scheduling problem to minimise total tardiness," *International Journal of Production Research*, vol. 51, no. 12, pp. 3476–3487, 2013.
- [170] I. T. Tanev, T. Uozumi, and Y. Morotome, "Hybrid evolutionary algorithm-based real-world flexible job shop scheduling problem : application service provider approach," *Applied soft computing*, vol. 5, no. 1, pp. 87–100, 2004.
- [171] A. Rajabinasab and S. Mansour, "Dynamic flexible job shop scheduling with alternative process plans : an agent-based approach," *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, vol. 54, no. 9-12, pp. 1091–1107, 2011.
- [172] F. Geyik and A. T. Dosođru, "Process plan and part routing optimization in a dynamic flexible job shop scheduling environment : an optimization via simulation approach," *Neural Computing and Applications*, vol. 23, no. 6, pp. 1631–1641, 2013.
- [173] D. Zhou and L. Zeng, "A flexible job-shop scheduling method based on hybrid genetic annealing algorithm," *JOURNAL OF INFORMATION & COMPUTATIONAL SCIENCE*, vol. 10, no. 17, pp. 5541–5549, 2013.
- [174] H.-H. Doh, J.-M. Yu, J.-S. Kim, D.-H. Lee, and S.-H. Nam, "A priority scheduling approach for flexible job shops with multiple process plans," *International Journal of Production Research*, vol. 51, no. 12, pp. 3748–3764, 2013.
- [175] L. Nie, L. Gao, P. Li, and X. Shao, "Reactive scheduling in a job shop where jobs arrive over time," *Computers & Industrial Engineering*, vol. 66, no. 2, pp. 389–405, 2013.
- [176] K. Gao, F. Yang, M. Zhou, Q. Pan, and P. N. Suganthan, "Flexible job-shop rescheduling for new job insertion by using discrete jaya algorithm," *IEEE transactions on cybernetics*, vol. 49, no. 5, pp. 1944–1955, 2018.
- [177] L. Yin, X. Li, L. Gao, C. Lu, and Z. Zhang, "A novel mathematical model and multi-objective method for the low-carbon flexible job shop scheduling problem," *Sustainable Computing : Informatics and Systems*, vol. 13, pp. 15–30, 2017.
- [178] S. Lee, I. Moon, H. Bae, and J. Kim, "Flexible job-shop scheduling problems with 'and'/'or'precedence constraints," *International Journal of Production Research*, vol. 50, no. 7, pp. 1979–2001, 2012.
- [179] H. Liu, A. Abraham, and Z. Wang, "A multi-swarm approach to multi-objective flexible job-shop scheduling problems," *Fundamenta Informaticae*, vol. 95, no. 4, pp. 465–489, 2009.
- [180] Y. Demir and S. K. İşleyen, "Evaluation of mathematical models for flexible job-shop scheduling problems," *Applied Mathematical Modelling*, vol. 37, no. 3, pp. 977–988, 2013.

- [181] H. M. Wagner, “An integer linear-programming model for machine scheduling,” *Naval Research Logistics Quarterly*, vol. 6, no. 2, pp. 131–140, 1959.
- [182] A. S. Manne, “On the job-shop scheduling problem,” *Operations Research*, vol. 8, no. 2, pp. 219–223, 1960.
- [183] E. H. Bowman, “The schedule-sequencing problem,” *Operations Research*, vol. 7, no. 5, pp. 621–624, 1959.
- [184] P. Fattahi, M. S. Mehrabad, and F. Jolai, “Mathematical modeling and heuristic approaches to flexible job shop scheduling problems,” *Journal of intelligent manufacturing*, vol. 18, no. 3, pp. 331–342, 2007.
- [185] J. Gao, M. Gen, and L. Sun, “Scheduling jobs and maintenances in flexible job shop with a hybrid genetic algorithm,” *Journal of Intelligent Manufacturing*, vol. 17, no. 4, pp. 493–507, 2006.
- [186] K.-H. Kim and P. Egbelu, “Scheduling in a production environment with multiple process plans per job,” *International Journal of Production Research*, vol. 37, no. 12, pp. 2725–2753, 1999.
- [187] V. Roshanaei, A. Azab, and H. ElMaraghy, “Mathematical modelling and a meta-heuristic for flexible job shop scheduling,” *International Journal of Production Research*, vol. 51, no. 20, pp. 6247–6274, 2013.
- [188] N. Imanipour, “Modeling & solving flexible job shop problem with sequence dependent setup times,” in *2006 International Conference on Service Systems and Service Management*, vol. 2. IEEE, 2006, pp. 1205–1210.
- [189] C. Low and T.-H. Wu, “Mathematical modelling and heuristic approaches to operation scheduling problems in an fms environment,” *International Journal of Production Research*, vol. 39, no. 4, pp. 689–708, 2001.
- [190] X. Luo, Q. Qian, and Y. F. Fu, “Improved genetic algorithm for solving flexible job shop scheduling problem,” *Procedia Computer Science*, vol. 166, pp. 480–485, 2020.
- [191] J. H. Holland, “Adaptation in natural and artificial systems, university of michigan press,” *Ann arbor, MI*, vol. 1, no. 97, p. 5, 1975.
- [192] I. Kacem, S. Hammadi, and P. Borne, “Approach by localization and genetic manipulation algorithm for flexible job-shop scheduling problem,” in *2001 IEEE International Conference on Systems, Man and Cybernetics. e-Systems and e-Man for Cybernetics in Cyberspace (Cat. No. 01CH37236)*, vol. 4. IEEE, 2001, pp. 2599–2604.

- 
- [193] G. Zhang, L. Gao, and Y. Shi, "An effective genetic algorithm for the flexible job-shop scheduling problem," *Expert Systems with Applications*, vol. 38, no. 4, pp. 3563–3573, 2011.
- [194] S. Ishikawa, R. Kubota, and K. Horio, "Effective hierarchical optimization by a hierarchical multi-space competitive genetic algorithm for the flexible job-shop scheduling problem," *Expert Systems with Applications*, vol. 42, no. 24, pp. 9434–9440, 2015.
- [195] I. Chaudry, A. M. Khan, and A. A. Khan, "A genetic algorithm for flexible job shop scheduling," in *Proceedings of the world congress on engineering*, vol. 1, 2013, pp. 703–708.
- [196] Y. Demir and S. K. İşleyen, "An effective genetic algorithm for flexible job-shop scheduling with overlapping in operations," *International Journal of Production Research*, vol. 52, no. 13, pp. 3905–3921, 2014.
- [197] D. Lei, "Co-evolutionary genetic algorithm for fuzzy flexible job shop scheduling," *Applied Soft Computing*, vol. 12, no. 8, pp. 2237–2245, 2012.
- [198] J. Gao, L. Sun, and M. Gen, "A hybrid genetic and variable neighborhood descent algorithm for flexible job shop scheduling problems," *Computers & Operations Research*, vol. 35, no. 9, pp. 2892–2907, 2008.
- [199] M. Gholami and M. Zandieh, "Integrating simulation and genetic algorithm to schedule a dynamic flexible job shop," *Journal of Intelligent Manufacturing*, vol. 20, no. 4, p. 481, 2009.
- [200] I. Driss, K. N. Mouss, and A. Laggoun, "A new genetic algorithm for flexible job-shop scheduling problems," *Journal of Mechanical Science and Technology*, vol. 29, no. 3, pp. 1273–1281, 2015.
- [201] X. Wang, L. Gao, C. Zhang, and X. Shao, "A multi-objective genetic algorithm based on immune and entropy principle for flexible job-shop scheduling problem," *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, vol. 51, no. 5-8, pp. 757–767, 2010.
- [202] W. Teekeng and A. Thammano, "Modified genetic algorithm for flexible job-shop scheduling problems," *Procedia Computer Science*, vol. 12, pp. 122–128, 2012.
- [203] N. Al-Hinai and T. ElMekkawy, "An efficient hybridized genetic algorithm architecture for the flexible job shop scheduling problem," *Flexible Services and Manufacturing Journal*, vol. 23, no. 1, pp. 64–85, 2011.
- [204] F. Pezzella, G. Morganti, and G. Ciaschetti, "A genetic algorithm for the flexible job-shop scheduling problem," *Computers & Operations Research*, vol. 35, no. 10, pp. 3202–3212, 2008.
- [205] L. De Giovanni and F. Pezzella, "An improved genetic algorithm for the distributed and flexible job-shop scheduling problem," *European journal of operational research*, vol. 200, no. 2, pp. 395–408, 2010.

- [206] M. Rohaninejad, A. Kheirkhah, P. Fattahi, and B. Vahedi-Nouri, "A hybrid multi-objective genetic algorithm based on the electre method for a capacitated flexible job shop scheduling problem," *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, vol. 77, no. 1-4, pp. 51–66, 2015.
- [207] D. Kress and D. Müller, "Mathematical models for a flexible job shop scheduling problem with machine operator constraints," *IFAC-PapersOnLine*, vol. 52, no. 13, pp. 94–99, 2019.
- [208] M. Yazdani, M. Zandieh, R. Tavakkoli-Moghaddam, and F. Jolai, "Two meta-heuristic algorithms for the dual-resource constrained flexible job-shop scheduling problem," *Scientia Iranica*, vol. 22, no. 3, pp. 1242–1257, 2015.
- [209] D. Lei and X. Guo, "Variable neighbourhood search for dual-resource constrained flexible job shop scheduling," *International Journal of Production Research*, vol. 52, no. 9, pp. 2519–2529, 2014.
- [210] I. Kacem, S. Hammadi, and P. Borne, "Approach by localization and multiobjective evolutionary optimization for flexible job-shop scheduling problems," *IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics, Part C (Applications and Reviews)*, vol. 32, no. 1, pp. 1–13, 2002.
- [211] D. Rooyani and F. M. Defersha, "An efficient two-stage genetic algorithm for flexible job-shop scheduling," *IFAC-PapersOnLine*, vol. 52, no. 13, pp. 2519–2524, 2019.
- [212] M. R. Garey, D. S. Johnson, and R. Sethi, "The complexity of flowshop and jobshop scheduling," *Mathematics of operations research*, vol. 1, no. 2, pp. 117–129, 1976.
- [213] W. Xia and Z. Wu, "An effective hybrid optimization approach for multi-objective flexible job-shop scheduling problems," *Computers & Industrial Engineering*, vol. 48, no. 2, pp. 409–425, 2005.
- [214] A. Azzouz, M. Ennigrou, and L. Ben Said, "A hybrid algorithm for flexible job-shop scheduling problem with setup times," *International Journal of Production Management and Engineering*, vol. 5, no. 1, pp. 23–30, 2017.
- [215] P. Sriboonchandr, N. Kriengkorakot, and P. Kriengkorakot, "Improved differential evolution algorithm for flexible job shop scheduling problems," *Mathematical and Computational Applications*, vol. 24, no. 3, p. 80, 2019.
- [216] H. E. Nouri, O. B. Driss, and K. Ghédira, "Solving the flexible job shop problem by hybrid metaheuristics-based multiagent model," *Journal of Industrial Engineering International*, vol. 14, no. 1, pp. 1–14, 2018.
- [217] F. Abderrabi, M. Godichaud, A. Yalaoui, F. Yalaoui, L. Amodeo, A. Qerimi, and E. Thivet, "Mathematical model for scheduling food production in hospital catering," *21st IFAC World Congress*, Berlin, Germany, July 12–17, 2020.

- 
- [218] F. Abderrabi, M. Godichaud, A. Yalaoui, F. Yalaoui, L. Amodeo, A. Qerimi, and E. Thivet, “Mathematical model for food production scheduling in hospital catering,” *International Conference in Optimization and Learning*, Cádiz, Spain, February 17–19, 2020.
- [219] F. Abderrabi, M. Godichaud, A. Yalaoui, F. Yalaoui, L. Amodeo, A. Qerimi, and E. Thivet, “Mathematical model and metaheuristics for scheduling production processes in hospital catering,” *International Conference in Optimization and Learning*, Catania, Italy, June 21–23, 2021.
- [220] S. Bayat Movahed, “Linear programming assisted genetic algorithm for solving a comprehensive job shop lot streaming problem,” Ph.D. dissertation, 2014.
- [221] H. ElMaraghy, V. Patel, and I. B. Abdallah, “Scheduling of manufacturing systems under dual-resource constraints using genetic algorithms,” *Journal of Manufacturing Systems*, vol. 19, no. 3, pp. 186–201, 2000.
- [222] I. Kacem, “Genetic algorithm for the flexible job-shop scheduling problem,” in *SMC’03 Conference Proceedings. 2003 IEEE International Conference on Systems, Man and Cybernetics. Conference Theme-System Security and Assurance (Cat. No. 03CH37483)*, vol. 4. IEEE, 2003, pp. 3464–3469.
- [223] S. Sivanandam and S. Deepa, “Introduction to genetic algorithms : Springer science & business media,” 2007.
- [224] D. E. Goldberg, B. Korb, and K. Deb, “Messy genetic algorithms : Motivation, analysis, and first results,” *Complex systems*, vol. 3, no. 5, pp. 493–530, 1989.
- [225] E.-G. Talbi, *Metaheuristics : from design to implementation*. John Wiley & Sons, 2009, vol. 74.
- [226] O. S. Akgündüz and S. Tunalı, “A review of the current applications of genetic algorithms in mixed-model assembly line sequencing,” *International Journal of Production Research*, vol. 49, no. 15, pp. 4483–4503, 2011.
- [227] O. Martin, S. W. Otto, and E. W. Felten, *Large-step Markov chains for the traveling salesman problem*. Citeseer, 1991.
- [228] H. R. Lourenço, O. C. Martin, and T. Stützle, “Handbook of metaheuristics, chapter iterated local search,” 2002.
- [229] T. Stützle, “Local search algorithms for combinatorial problems-analysis, algorithms and new applications,” *DISKI-Dissertationen zur Künstliken Intelligenz. In x, Sankt Augustin, Germany*, 1999.



- [230] H. R. Lourenço, O. C. Martin, and T. Stützle, “Iterated local search : Framework and applications,” in *Handbook of metaheuristics*. Springer, 2019, pp. 129–168.
- [231] H. Hoos and T. Stutzle, “Stochastic local search : Foundations and applications morgan kaufmann publishers,” 2005.
- [232] A. S. Jain, B. Ranganam, and S. Meeran, “New and “stronger” job-shop neighbourhoods : a focus on the method of nowicki and smutnicki (1996),” *Journal of Heuristics*, vol. 6, no. 4, pp. 457–480, 2000.
- [233] M.-É. Marmion, “Recherche locale et optimisation combinatoire : de l’analyse structurelle d’un problème à la conception d’algorithmes efficaces,” Ph.D. dissertation, Université des Sciences et Technologie de Lille-Lille I, 2011.
- [234] H. R. Lourenço, O. C. Martin, and T. Stützle, “Iterated local search : Framework and applications handbook of metaheuristics. volume 146 of international series in operations research & management science, chapter 12,” 2010.
- [235] R. Roy, “Society of manufacturing engineers,” *New York*, 1990.
- [236] K. Dehnad, “Quality control, robust design, and the taguchi method,” *USA*, 1989.
- [237] F. Abderrabi, M. Godichaud, A. Yalaoui, F. Yalaoui, L. Amodeo, A. Qerimi, and E. Thivet, “Optimization in hospital logistics : scheduling production processes in hospital catering,” *Smart Health International Conference*, Troyes, France, 30/09–02/10.
- [238] F. Abderrabi, M. Godichaud, A. Yalaoui, F. Yalaoui, L. Amodeo, A. Qerimi, and E. Thivet, “Optimization in hospital logistics : improving working conditions and employees well-being,” *Smart Health International Conference*, Troyes, France, 30/09–02/10.
- [239] F. Abderrabi, M. Godichaud, A. Yalaoui, F. Yalaoui, L. Amodeo, A. Qerimi, and E. Thivet, “Flexible job shop scheduling problem with sequence dependent setup time and job splitting : Hospital catering case study,” *Applied Sciences*, vol. 11, no. 4, p. 1504, 2021.
- [240] P. H. Sneath, R. R. Sokal *et al.*, *Numerical taxonomy. The principles and practice of numerical classification.*, 1973.
- [241] T. A. Wiggerts, “Using clustering algorithms in legacy systems modularization,” in *Proceedings of the Fourth Working Conference on Reverse Engineering*. IEEE, 1997, pp. 33–43.
- [242] R. W. Hamming, “Error detecting and error correcting codes,” *The Bell system technical journal*, vol. 29, no. 2, pp. 147–160, 1950.

# Fatima ABDERRABI

## Doctorat : Optimisation et Sûreté des Systèmes

### Année 2021

#### Ordonnancement de la production des repas d'un hôpital dans un contexte d'amélioration du bien-être au travail

Les travaux menés dans le cadre de cette thèse, ont été motivés par une problématique issue du domaine hospitalier portant sur l'optimisation de la chaîne logistique alimentaire du centre hospitalier de Troyes (CHT). Le CHT a mis en place des mesures importantes afin de répondre efficacement aux besoins des patients et pour améliorer les conditions de travail et le bien-être des employés. La contribution du présent travail consiste à déterminer le meilleur plan pour répondre aux demandes des clients en matière de repas et de proposer des axes et des pistes pour améliorer le bien-être au travail. L'objectif est de fournir des outils d'aide à la décision pour l'optimisation et la réorganisation de la chaîne logistique alimentaire en accordant une attention particulière au facteur humain. Le problème étudié est de type job-shop flexible avec setups dépendants des séquences et fractionnement des tâches en lots en présence de différents types de ressources. Le critère d'optimisation étudié est la minimisation du temps de présence total des tâches dans le système de production. Un nouveau modèle mathématique et des métaheuristiques hybrides basées sur des algorithmes génétiques et des méthodes de recherche locale itérative combinées avec des recherches locales ont été développés. Les résultats d'implémentation de ces méthodes ont prouvé leur efficacité pour l'ordonnancement des processus de production alimentaire et ont permis des améliorations significatives de l'organisation réelle et de la performance du système de production étudié.

Mots clés : hôpitaux, services de restauration – bien-être – ordonnancement (gestion) – modèles mathématiques – métaheuristiques – heuristiques.

#### Scheduling of Meals Production in a Hospital in Context of Improving Well-being at Work

The research work carried out within the framework of this thesis was motivated by a real problem issued from the hospital field relating to the optimization of the food supply chain processes of the hospital of Troyes. The Troyes hospital center has implemented important measures to effectively meet the demands of patients and to improve working conditions and employee's well-being. The contribution of the present work consists in determining the best plan to meet the customers' demands in matters of meals and to propose axes and tracks to improve the well-being of the catering service employees. The objective is to provide methods and decision support tools for optimizing and reorganizing the food supply chain with particular attention to the human factor. The studied problem in this thesis is considered as a flexible job-shop with sequence-dependent setup times and splitting of jobs in batches with the presence of different types of resources. The studied optimization criterion is the minimization of the total flow time. A new mathematical model and hybrid metaheuristics have been developed based on genetic algorithms and iterative local search methods combined with local searches. The implementation results of these methods proved their effectiveness for the scheduling of food production processes and allowed significant improvements in the real organization and the performance of the studied production system.

Keywords: hospitals, food service – human comfort – production scheduling – mathematical models – metaheuristics – heuristics.

Thèse réalisée en partenariat entre :

