



STAGE CONVENTIONNÉ ENTRE:  
ÉCOLE CENTRALE DE CASABLANCA  
& ÉCOLE SUPÉRIEURE DES INDUSTRIES DU TEXTILE ET DE L'HABILLEMENT

## RAPPORT DE STAGE ASSISTANT INGÉNIEUR

---

# Modèle FLB, application numérique et intelligence artificielle pour l'équilibrage des lignes textiles

FLB Model, Digital Application and AI for Textile Line  
Balancing

---

de 28 Avril 2025  
Au 25 Juillet 2025

**Élève :**  
Youssef KHALFA

**Encadrant :**  
Abdel Fattah MOULOUD

Année Universitaire 2024-2025

# Remerciements

Je tiens à exprimer ma profonde gratitude à **Monsieur Mouloud Abdelfattah**, mon tuteur de stage à l'**ESITH** (École Supérieure des Industries du Textile et de l'Habille-ment), pour sa disponibilité, ses conseils éclairés et l'intérêt qu'il a porté à mon travail tout au long de cette expérience. Son accompagnement bienveillant et exigeant a été déterminant dans la réussite de cette mission.

J'exprime également mes sincères remerciements à **Monsieur Sibari Anass**, enseignant à l'**École Centrale Casablanca**, pour son soutien précieux dès le début du stage, notamment en facilitant l'accès à des ressources scientifiques qui ont largement nourri ma réflexion.

Je tiens aussi à remercier les **employés de l'ESITH** pour leur gentillesse, leur bienveillance et leur disponibilité, qui ont grandement contribué à créer un environnement de travail serein et agréable tout au long de mon stage.

Enfin, je remercie l'**École Centrale Casablanca** pour son encadrement académique et pour m'avoir permis de vivre cette expérience professionnelle enrichissante, en lien direct avec les réalités du monde industriel. Je remercie également l'entreprise **Filmod** pour l'accueil qui m'a été réservé lors des visites et échanges, offrant un aperçu concret et précieux du terrain industriel.

Enfin, j'adresse mes sincères remerciements à **Monsieur Samir Tetouani** pour sa gentillesse, sa disponibilité et son soutien constant tout au long du stage.

# Résumé

Ce rapport présente les travaux réalisés dans le cadre d'un stage Assistant Ingénieur à l'**ESITH**, au sein du pôle dédié à l'optimisation des processus industriels. L'objectif principal de la mission était d'optimiser l'équilibrage des lignes de production textile, en tenant compte des contraintes humaines, temporelles, et des dépendances entre tâches.

Pour répondre à cette problématique, une **méthode algorithmique originale**, nommée **MTE (Méthode de Traitement des Équilibres)**, a été développée. Celle-ci repose sur une modélisation des opérations sous forme de graphe orienté avec contraintes de précédence, intégrant un mécanisme de tolérance pour gérer la variabilité des temps opératoires. La méthode a été comparée à des heuristiques classiques (SPT, RPW) sur des jeux de données réels issus d'ateliers de confection.

Le travail a débouché sur la **création d'un outil numérique complet**, combinant *Python*, *Excel* et une interface *web*, capable d'automatiser le processus d'équilibrage, de générer des visualisations, et de produire des rapports PDF interprétables par les équipes de production. Enfin, une réflexion exploratoire a été amorcée autour de l'introduction du **machine learning** pour renforcer la capacité prédictive et adaptative du système.

Cette mission m'a permis de mobiliser des compétences en *optimisation combinatoire*, en *modélisation algorithmique*, ainsi qu'en *développement d'outils numériques*, dans un environnement industriel concret à forte contrainte métier.

## Executive Summary

This report presents the work carried out during an Assistant Engineer internship at **ESITH**, within the department dedicated to industrial process optimization. The main objective of the mission was to optimize the balancing of textile production lines, taking into account human, temporal, and precedence constraints.

To tackle this challenge, an **original algorithmic method** called **MTE (Method for Treating Balancing)** was developed. It relies on modeling operations as a directed graph with precedence constraints and incorporates a tolerance mechanism to address variability in operation times. The method was benchmarked against classical heuristics (SPT, RPW) using real-world datasets from textile workshops.

The project led to the **development of a complete digital tool** combining *Python*, *Excel*, and a *web interface*, capable of automating the balancing process, generating visualizations, and exporting comprehensive PDF reports for production teams. Additionally, an exploratory approach was initiated to introduce **machine learning** as a means of enhancing the system's predictive and adaptive capabilities.

This mission allowed me to apply and deepen my skills in *combinatorial optimization*, *algorithmic modeling*, and *digital tool development* in a concrete industrial environment with strong operational constraints.

# Introduction

Le secteur du textile et de l'habillement, tout comme d'autres industries à forte variabilité (automobile, aéronautique, agroalimentaire), repose sur des lignes de production complexes où l'équilibrage des tâches est essentiel pour améliorer la performance globale.

Contrairement à l'idée reçue selon laquelle l'**industrie 4.0** rime avec automatisation totale, les approches modernes valorisent les compétences humaines — polyvalence, intelligence et adaptabilité — comme leviers d'excellence opérationnelle.

Ce stage, réalisé sur une période de trois mois à l'**ESITH**, représente pour moi une expérience particulièrement marquante, à plus d'un titre.

Il s'agissait tout d'abord de ma première immersion dans un environnement de recherche et développement (R&D), avec un encadrement exigeant, une autonomie progressive et une forte dimension analytique. C'était également ma première découverte du secteur textile, et plus précisément de l'univers des **lignes de production industrielles**, qui m'était jusque-là totalement inconnu.

Le projet qui m'a été confié portait sur une problématique à la fois **complexe, technique et fortement opérationnelle** :

**Comment équilibrer efficacement une ligne  
de production textile  
en respectant les précédences entre tâches,  
les contraintes de temps et la capacité  
humaine des postes ?**

Le stage s'est articulé autour de trois grandes missions complémentaires :

1. **Une phase de recherche**
2. **Une phase de modélisation**
3. **Une phase de développement informatique**

En parallèle de cette dernière phase, une **exploration du machine learning** a été amorcée, dans l'objectif de concevoir un modèle prédictif capable de proposer ou d'évaluer des répartitions d'équilibrage à partir d'historiques de données.

# Table des matières

<b>Remerciements</b>	<b>1</b>
<b>Résumé</b>	<b>2</b>
<b>Introduction générale</b>	<b>3</b>
<b>1 Missions et Objectifs</b>	<b>6</b>
<b>2 De l'état de l'art au cœur du modèle FLB</b>	<b>8</b>
2.1 Principes généraux de l'équilibrage de ligne de production . . . . .	8
2.1.1 Paramètres clé . . . . .	8
2.1.2 Principe fondamental classique d'équilibrage . . . . .	9
2.2 Pistes de solutions recherchées et analysées . . . . .	10
2.3 Méthodes heuristiques classiques d'équilibrage . . . . .	11
2.4 Présentation de la méthode MTE - FLB <i>Flexible Balancing Line</i> . . . . .	12
2.5 Modélisation mathématique du modèle . . . . .	14
<b>3 De la théorie à l'outil numérique</b>	<b>16</b>
3.1 Developpement de l'application Python . . . . .	16
3.1.1 Traitement des fichiers d'entrée (Excel) . . . . .	16
3.1.2 Création des fonctions d'équilibrage . . . . .	16
3.1.3 Outils d'analyse et visualisation . . . . .	17
3.2 Implémentation d'une solution web . . . . .	18
3.3 Vers une automatisation intelligente par apprentissage automatique . . . . .	19
<b>4 Évaluation des résultats et analyse comparative des approches</b>	<b>20</b>
4.1 Indicateurs de performance retenus . . . . .	20
4.2 Comparaison des résultats et interprétations . . . . .	21
4.3 Visualisations des résultats d'équilibrage . . . . .	22
<b>5 Perspectives d'amélioration et valorisation futures</b>	<b>24</b>
5.1 Limites actuelles du modèle et de l'implémentation . . . . .	24
5.2 Axes d'amélioration technique et scientifique . . . . .	25
5.3 Opportunités de valorisation et d'extension dans l'industrie . . . . .	25
<b>Conclusion Générale</b>	<b>27</b>
<b>Annexes</b>	<b>29</b>

# Table des figures

2.1	Schéma simplifié pour la problématique générale . . . . .	8
2.2	Poste de travail . . . . .	10
2.3	Logo de l'entreprise . . . . .	10
2.3	Caption . . . . .	13
3.1	Formulaire de demande pour client . . . . .	18
3.2	Tableau de gestion des demandes - pour Admin . . . . .	19
4.1	Indice de déséquilibre par Gamme . . . . .	22
4.2	Efficiencie maximale par Gamme . . . . .	22
4.2	Yamazumi 61228(2) . . . . .	22
4.3	Yamazumi 61228(3) . . . . .	22
4.4	Yamazumi 61228 . . . . .	22
4.5	Yamazumi 79615 . . . . .	22
4.6	Yamazumi allure 3 . . . . .	22
5.1	Interface de l'espace client . . . . .	29
5.2	Exemple du rapport PDF généré . . . . .	29
5.3	Reception du rapport sur e-mail (Gmail) . . . . .	30

# Chapitre 1

## Missions et Objectifs

### Premiers constats et cadrage de la problématique

Dès les premiers jours de stage, il m’a été essentiel de me familiariser avec l’environnement de la production textile. J’ai ainsi entrepris une phase d’observation et de recherche afin de comprendre la structure d’une ligne de fabrication typique dans ce secteur : séquençement des opérations, diversité des postes de travail, typologie des machines et rôle crucial de la main-d’œuvre dans la chaîne de valeur.

Cette prise de contact s’est accompagnée d’une immersion dans les méthodes d’optimisation utilisées dans les ateliers. En parallèle de l’observation terrain, j’ai mené une revue documentaire approfondie incluant des articles scientifiques accessibles en ligne, des publications spécialisées, ainsi que mes ressources académiques issues de ma formation en *Aide à la Décision*. En particulier, mes connaissances en optimisation combinatoire, en programmation linéaire, et en théorie des graphes m’ont permis de mieux appréhender les algorithmes classiques d’équilibrage de lignes.

### Définition de la stratégie de travail

Après avoir assimilé les spécificités du secteur textile, clarifié la problématique et défini les objectifs du stage, nous avons, en concertation avec mon tuteur, établi une stratégie de travail structurée en deux grandes phases complémentaires.

#### Mission 1 : Approfondissement scientifique

Cette première mission visait à renforcer ma compréhension des modèles d’équilibrage existants tout en m’appropriant le modèle **MTE** (Méthode de Traitement des Équilibres) proposé en interne. Pour cela, j’ai mené une étude scientifique approfondie portant sur :

- les heuristiques classiques d’équilibrage (SPT, RPW, nRPW, etc.) ;
- les méthodes d’optimisation à base de graphes et de programmation linéaire ;
- les indicateurs de performance pertinents pour l’évaluation d’un équilibrage.

#### Mission 2 : Conception d’une application complète d’équilibrage

La deuxième mission avait pour objectif de transformer les travaux initiaux en une application opérationnelle utilisable par les équipes de production. Elle s’est déroulée en quatre volets :

1. **Traitement de fichiers Excel** contenant des données réelles issues des plans de production de différents articles textiles.
2. **Implémentation du modèle MTE** via un pseudocode partagé par mon tuteur, en y intégrant les contraintes de précédence et les seuils de tolérance.

3. **Génération d'un comparatif automatisé**, incluant des fichiers Excel synthétisant les résultats par méthode ainsi que des visualisations graphiques des charges par poste.
4. **Développement d'une interface applicative** : un formulaire logiciel prenant en entrée les fichiers Excel, exécutant l'équilibrage, puis exportant automatiquement un fichier PDF de bilan incluant les résultats, visualisations et commentaires.
5. **Déploiement d'une application web accessible aux partenaires** (ateliers, entreprises, clients), comportant :
  - une **interface client** simplifiée, permettant de soumettre un fichier Excel et de recevoir un rapport PDF automatisé,
  - une **interface propriétaire** pour visualiser, ajuster ou analyser plus finement les résultats et modifier les paramètres internes du modèle.

Cette stratégie par étapes m'a permis d'alterner phases de modélisation, de développement et d'expérimentation, tout en assurant une montée en compétence progressive sur les aspects théoriques et techniques du projet.

### **Mission 3 : Exploration d'un modèle prédictif basé sur le Machine Learning**

La troisième mission s'inscrit dans une perspective d'amélioration continue et d'intelligence artificielle appliquée à l'équilibrage industriel. Elle vise à tirer profit des données générées par l'application (fichiers d'entrée, résultats des équilibrages, remarques utilisateurs) pour concevoir un modèle de prédiction capable de proposer automatiquement des répartitions efficaces.

Pour ce faire, les étapes suivantes ont été envisagées :

1. **Structuration d'une base de données** regroupant l'ensemble des interactions avec l'application : fichiers Excel soumis par les utilisateurs, résultats des équilibrages (postes, temps, efficacité, fluidité), ainsi que les retours qualitatifs éventuels (remarques ou ajustements).
2. **Conception d'une architecture de modèle d'apprentissage automatique** (Machine Learning ou Deep Learning selon la complexité des données), ayant pour but de prédire une solution d'équilibrage ou de recommander le meilleur algorithme applicable à une instance donnée.
3. **Évaluation comparative des performances** entre :
  - le modèle d'apprentissage et le modèle mathématique MTE développé durant le stage,
  - le modèle d'apprentissage et les méthodes classiques (SPT, RPW, etc.),selon des critères tels que l'efficacité, la fluidité, la stabilité des résultats, et le temps de calcul.

Cette mission permet de placer le projet dans une dynamique d'autonomisation intelligente des outils industriels, tout en ouvrant la voie à des applications futures intégrant l'intelligence artificielle comme moteur de décision.



# Chapitre 2

## De l'état de l'art au cœur du modèle FLB

### 2.1 Principes généraux de l'équilibrage de ligne de production

Il s'agit de répartir les différentes opérations d'un processus de fabrication entre les postes de travail, de manière à ce qu'aucun poste ne constitue un goulot d'étranglement et que le flux de production reste fluide et efficace.

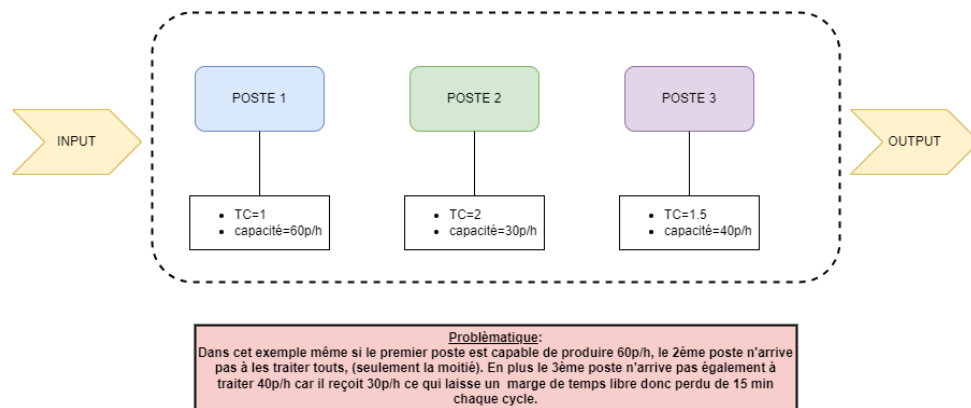


FIGURE 2.1 – Schéma simplifié pour la problématique générale

L'ensemble des approches présentées dans ce chapitre s'inscrit dans la logique du Lean Manufacturing, et plus particulièrement dans le cadre méthodologique DMAIC (Define–Measure–Analyze–Improve–Control). Cette démarche structurée vise à améliorer en continu l'efficacité des lignes de production. L'équilibrage y joue un rôle central, en permettant de réduire les gaspillages, d'optimiser les charges de travail et d'aligner le flux de production sur la demande réelle, conformément aux principes fondamentaux du Lean.

#### 2.1.1 Paramètres clé

##### Temps Alloué par opération (TA)

Correspond à la durée nécessaire pour qu'un opérateur réalise une tâche ou une opération spécifique sur la ligne de production. Il est généralement mesuré en secondes ou minutes. Le TA peut être obtenu par plusieurs méthodes :

- Mesuré directement par chronométrage (étude de temps)
- SMV (Standard Minute Value)
- MTM (Methods-Time Measurement)

- via outils modernes comme Dartfish, TimeStudy.co, voire Computer Vision (Drishti, Oculavis)

TABLE 2.1 – Exemple de temps alloué par opération dans une ligne textile

Code	Opération	TA (min)	Machine / Remarques
OP1	Couper le tissu selon gabarit	1.5	Cisaille manuelle
OP2	Assembler épaules	2.2	Surjeteuse 3 fils
OP3	Coudre encolure	1.3	Piqueuse simple aiguille
OP4	Monter manches	2.8	Surjeteuse large
OP5	Ourler bas du vêtement	1.1	Ourleuse invisible

### Temps de Cycle cible (TC) ou Takt Time (TT)

La base correspond au rythme auquel un produit doit sortir de la ligne pour répondre à la demande client. Le Takt Time est généralement défini comme :

$$\text{Takt Time} = \frac{\text{Temps disponible}}{\text{Demande client}}$$

### Temps Total de Travail

Le temps total de travail correspond à la somme des durées de toutes les opérations nécessaires à la fabrication d'un produit, et représente la charge globale à répartir entre les postes lors de l'équilibrage de la ligne. Défini comme :

$$T_{\text{total}} = \sum_{i=1}^n TA_i$$

### Nombre Théorique de Postes (NTP)

Le nombre de postes théoriques représente le nombre minimum de postes de travail nécessaires pour réaliser l'ensemble des opérations dans les délais imposés par le Takt Time. Il correspond à une hypothèse idéale, dans laquelle les tâches seraient parfaitement réparties sans pertes, sans contraintes de précédence ni interruptions. Défini comme :

$$N_{\text{théorique}} = \left\lceil \frac{T_{\text{total}}}{TT} \right\rceil$$

### 2.1.2 Principe fondamental classique d'équilibrage

Le principe de base consiste à **empiler** les opérations dans chaque poste tant que leur somme reste inférieure ou proche du **Takt Time**. Une tâche ou un poste dépassant le TT (càd  $TA > TT$ ) crée un ralentissement, Donc quand une nouvelle opération ferait dépasser ce seuil, on crée un nouveau poste, et on recommence.

## Work sharing

Dans certains cas, notamment lorsque les opérations ne peuvent pas être découpées ou déplacées facilement, les responsables de ligne appliquent une logique dite de Work Sharing. Cette méthode consiste à redistribuer le temps libre de certains opérateurs pour aider les postes plus chargés.

Par exemple, un opérateur dont la charge est inférieure au Takt Time peut ponctuellement effectuer une opération simple d'un autre poste en surcharge. Cela permet de lisser les déséquilibres sans modifier la structure des opérations, tout en valorisant la polyvalence du personnel. Le Work Sharing est ainsi une stratégie d'équilibrage humainement adaptable, en accord avec les principes du Lean Manufacturing.

## Visite Entreprise



FIGURE 2.2 – Poste de travail



FIGURE 2.3 – Logo de l'entreprise

Lors d'une visite à **Groupe Filmod Sarl**, entreprise marocaine spécialiste du prêt-à-porter féminin chaîne et trame située à Casablanca, j'ai pu observer de près le fonctionnement réel d'une ligne de production textile, en particulier l'enchaînement entre les postes, les machines et les opérateurs.

Un opérateur responsable, en charge de l'organisation de la ligne, commence par établir la liste des opérations à réaliser, accompagnées de leurs temps approximatifs, souvent connus de mémoire ou issus de chronométrage terrain. Il estime ensuite le nombre de postes nécessaires à partir du rythme de production souhaité. Ensuite, il affecte les tâches poste par poste, en groupant les opérations courtes ou en répartissant les tâches longues selon la maîtrise des opérateurs disponibles.

Tout cela est fait manuellement, à l'aide d'un tableau ou d'un simple fichier Excel, en tenant compte de la disposition des machines et de la polyvalence du personnel. Cette démarche empirique repose largement sur l'expérience, l'observation, et l'ajustement progressif en fonction du comportement réel de la ligne.

## 2.2 Pistes de solutions recherchées et analysées

- **Méthodes heuristiques d'affectation des tâches** : SPT, RPW, nRPW, LCR, utilisées pour leur simplicité et leur rapidité d'exécution dans des contextes industriels réels.

- **Programmation linéaire en nombres entiers mixtes (MILP)** : notamment dans l'article 6, pour modéliser l'équilibrage de ligne comme un problème d'optimisation combinatoire, proche du bin packing. Permet une solution théoriquement optimale.
- **Utilisation de solveurs industriels** : tels que IBM ILOG CPLEX Optimization Studio, pour résoudre les modèles MILP avec algorithmes de type branch-and-bound.
- **Modèles d'apprentissage automatique** :
  - Modèle flou décisionnel pour prioriser les actions de maintenance en fonction de leur impact (article sur la logique floue).
  - Premières pistes de modèle prédictif d'équilibrage basé sur des historiques de données (ML exploratoire).
- **Systèmes de production spécifiques** :
  - Ligne à cintres intelligente (Hanger System) pour automatiser le transfert entre postes.
  - Approches modulaires avec opérateurs multi-compétents.

## 2.3 Méthodes heuristiques classiques d'équilibrage

J'ai pu constater, à travers une lecture comparative approfondie de plusieurs articles scientifiques (listés en bibliographie), que les méthodes heuristiques représentent une solution pragmatique largement adoptée dans l'industrie.

Une **heuristique d'équilibrage** est une procédure algorithmique qui permet de générer un *ordre de traitement partiel ou total* sur un ensemble d'opérations  $T = \{t_1, t_2, \dots, t_n\}$ , en se basant sur une *fonction de priorité*  $f(t_i)$  définie à partir des *données de production*

### Utilité actuelle dans l'industrie

Lorsqu'un équilibrage manuel devient difficile à mettre en œuvre de manière cohérente, que ce soit à cause d'un trop grand nombre d'opérations ou de relations de précedence complexes, ces méthodes apportent des règles simples mais robustes pour ordonner les tâches et les affecter aux postes, tout en respectant les contraintes de temps et de séquence.

Elles sont particulièrement appréciées dans les systèmes de production en ligne, car elles permettent une répartition rapide et souvent efficace des opérations, sans nécessiter une modélisation mathématique complexe.

TABLE 2.2 – Comparaison des heuristiques d'équilibrage

Heuristique	Principe de tri	Usage en industrie textile
<b>SPT</b>	Tri des opérations par temps d'exécution croissant : $f(t_i) = TA_i$	Utilisé pour des lignes simples ou des tâches élémentaires répétitives (couture, surjet, repassage).
<b>RPW</b>	Tri par poids positionnel : $f(t_i) = \sum_{t_k > t_i} TA_k + TA_i$	Adapté aux séquences structurées, notamment pour le montage de pièces dépendantes (corps, manches, encolures).
<b>nRPW</b>	RPW ajusté avec pondérations : $f(t_i) = \alpha_i \cdot RPW(t_i)$	Approprié aux contextes à forte variabilité (petites séries, produits personnalisés) ou dans des démarches Lean avancées.

## Limitations fonctionnelles

Malgré leur efficacité dans de nombreux contextes industriels, les méthodes heuristiques présentent des **limitations structurelles** qui les rendent parfois insuffisantes dans des environnements complexes comme la production textile. Leur logique repose souvent sur un tri déterministe basé sur un unique critère (durée, poids positionnel, etc.), sans intégrer la **richesse des contraintes terrain**.

En particulier, elles ne tiennent pas compte de la *polyvalence des opérateurs*, de la *variabilité des machines*, des *tolérances sur les temps de poste*, ou encore des ajustements liés à l'ergonomie, à la fatigue ou à l'expérience.

Dans la réalité, un équilibrage efficace ne se limite pas à un empilement logique de tâches : il nécessite de considérer des **facteurs humains et opérationnels** qui influencent directement la performance d'une ligne. Cette limite justifie le recours à des approches plus flexibles, combinant modélisation algorithmique, logique métier et apprentissage automatique.

## 2.4 Présentation de la méthode MTE - FLB *Flexible Balancing Line*

### Motivation et contexte du développement

Le modèle FLB (Flexible Line Balancing) a émergé d'un constat partagé au sein de notre équipe encadrante, face aux limites des méthodes classiques d'équilibrage appliquées aux lignes de production textile.

Dès les premières observations sur le terrain et à travers l'analyse approfondie d'articles scientifiques, nous avons identifié un ensemble de contraintes et de réalités opérationnelles peu ou mal prises en compte par les approches existantes, notamment :

- une variabilité importante dans la durée et l'enchaînement des opérations,
- des précédences parfois implicites ou absentes des données brutes,
- des configurations de postes hétérogènes (machines, opérateurs),

→ et la nécessité d'introduire une tolérance réaliste dans la répartition.

Partant de ce diagnostic, nous avons décidé de concevoir un modèle plus souple, capable de refléter la complexité du terrain tout en permettant une automatisation complète de l'équilibrage.

## Démarche de conception et architecture du modèle

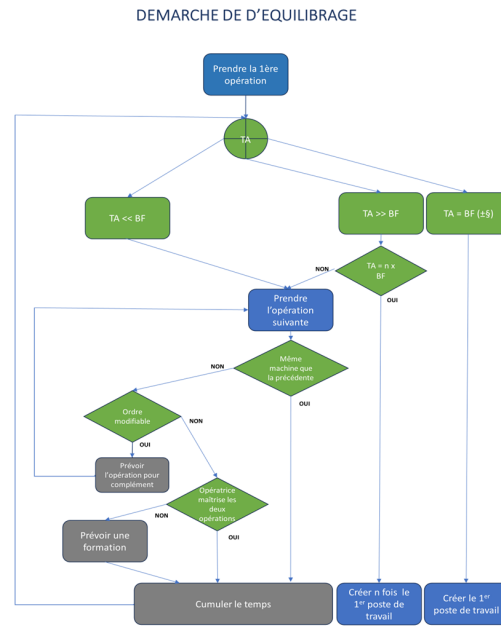


FIGURE 2.3 – Caption

Le modèle **FLB** que nous repose sur une logique d'affectation progressive et conditionnelle des opérations.

À chaque étape, l'algorithme sélectionne une opération disponible (dont les prédécesseurs sont déjà affectés) et évalue sa durée  $TA_i$  relativement au Takt Time ( $BF$ ) :

- Si  $TA_i \approx BF$ , l'opération constitue à elle seule un poste.
- Si  $TA_i \gg BF$ , le modèle vérifie si  $TA_i \approx n \cdot BF$ , auquel cas l'opération est *fragmentée* sur  $n$  postes.
- Si  $TA_i \ll BF$ , d'autres opérations compatibles sont cherchées pour *cumuler* les temps dans un même poste.

Le cumul se fait selon plusieurs conditions :

- la machine est-elle la même que pour l'opération précédente ?
- l'ordre est-il modifiable sans violer les précédences ?
- l'opératrice ou l'opérateur maîtrise-t-il les deux opérations ?

Selon les cas, le modèle décide de :

- regrouper les tâches dans un même poste,
- affecter l'opération à un complément,

- ou signaler la nécessité d'une formation.
- Techniquement, le modèle s'appuie sur :
  - un graphe de précedence  $G = (T, A)$ ,
  - une règle de fragmentation si  $TA_i > BF(1 + \varepsilon)$ ,
  - une tolérance d'équilibrage paramétrable,
  - un tri topologique pour respecter l'ordre logique.

## 2.5 Modélisation mathématique du modèle

### Pseudocode

Afin de structurer la logique d'affectation du modèle FLB de manière formelle et répliquable, nous avons conçu un algorithme basé sur un tri topologique des opérations.

---

**Algorithm 1** Tri Topologique (1/2)
 

---

```

1: Initialiser  $D(i) \leftarrow 0$ ,  $F(i) \leftarrow 0$  pour tout  $i$ 
2: Initialiser  $degEntree(i) \leftarrow 0$  pour tout  $i$ 
3: for  $i \leftarrow 1$  to  $N$  do
4:   for chaque  $k$  dans  $T[i].antecedents$  do
5:      $degEntree(i) \leftarrow degEntree(i) + 1$ 
6:   end for
7: end for
8: file  $\leftarrow$  file vide
9: for  $i \leftarrow 1$  to  $N$  do
10:  if  $degEntree(i) = 0$  then
11:    enfiler(file,  $i$ )
12:  end if
13: end for
14: ordre  $\leftarrow$  liste vide
15: while file non vide do
16:   $i \leftarrow$  defiler(file)
17:  ajouter  $i$  à ordre
18:  for chaque successeur  $j$  de  $i$  do
19:     $degEntree(j) \leftarrow degEntree(j) - 1$ 
20:    if  $degEntree(j) = 0$  then
21:      enfiler(file,  $j$ )
22:    end if
23:  end for
24: end while
  
```

---



---

**Algorithm 2** Tri Topologique (2/2)
 

---

```

1: if taille(ordre) <  $N$  then
2:   Erreur : cycle détecté
3:   Arrêter l'algorithme
4: end if
5: for chaque tâche  $i$  dans ordre do
6:   if  $T[i].antecedents$  est vide then
7:      $D(i) \leftarrow 0$ 
8:   else
9:      $maxFin \leftarrow 0$ 
10:    for chaque  $k$  dans  $T[i].antecedents$  do
11:      if  $F(k) > maxFin$  then
12:         $maxFin \leftarrow F(k)$ 
13:      end if
14:    end for
15:     $D(i) \leftarrow maxFin$ 
16:  end if
17:   $F(i) \leftarrow D(i) + T[i].duree$ 
18: end for
  
```

---

Ce pseudocode reflète les étapes fondamentales du modèle : il commence par construire le graphe de dépendances entre opérations, effectue un tri topologique pour respecter les précédences, puis calcule les dates de début et de fin de chaque tâche en fonction de leurs antécédents.

## Modèle mathématique

### Données :

- $T = \{1, \dots, n\}$  : tâches,  $t_i$  leur durée,  $P_i$  les prédécesseurs.
- $m$  : nombre de postes,  $BF$  : temps de cycle (Takt Time),  $\varepsilon$  : tolérance.

**Fragmentation** : si  $t_i > BF(1 + \varepsilon)$ , on divise  $i$  en  $k_i = \lceil \frac{t_i}{BF} \rceil$  sous-tâches de durée  $\approx \frac{t_i}{k_i}$ .

### Variables :

- $x_{ij} \in \{0, 1\}$  : tâche  $i$  affectée au poste  $j$ .
- $S_i, F_i = S_i + t_i$  : date de début et de fin de  $i$ .

### Objectif :

$$\min \max_j \sum_i t_i x_{ij} \quad \text{ou} \quad \min \sum_{j=1}^m \left( \max(0, \sum_i t_i x_{ij} - BF) \right)^2$$

### Contraintes :

$$\begin{aligned} \sum_{j=1}^m x_{ij} &= 1 && \forall i \quad (\text{Affectation unique}) \\ S_i &\geq F_k && \forall i, \forall k \in P_i \quad (\text{Précédence}) \\ F_i &= S_i + t_i && \forall i \\ \sum_i t_i x_{ij} &\leq BF(1 + \varepsilon) && \forall j \quad (\text{Tolérance}) \\ S_{i^{(k+1)}} &\geq F_{i^{(k)}} && \forall k = 1, \dots, k_i - 1 \quad (\text{Sous-tâches}) \end{aligned}$$



# Chapitre 3

## De la théorie à l’outil numérique

### 3.1 Développement de l’application Python

#### 3.1.1 Traitement des fichiers d’entrée (Excel)

Au début du développement, nous avons été confrontés à l’hétérogénéité des fichiers Excel fournis par l’entreprise, représentant différentes gammes de fabrication (veste, pantalon, etc.). Les structures variaient fortement : ordre des colonnes incohérent, informations parfois absentes (notamment les précédences), et présence de paramètres clés dispersés dans la feuille.

J’ai d’abord envisagé de créer un formulaire Excel standardisé à faire remplir par tous les utilisateurs, mais cette solution s’est révélée peu compatible avec les fichiers existants. J’ai donc opté pour une approche plus flexible : choisir un modèle de fichier représentatif, puis développer un script Python capable de localiser dynamiquement le tableau principal ainsi que les cellules contenant des paramètres critiques (Takt Time, rendement, etc.), peu importe leur position dans la feuille. (Voir Annexe)

#### 3.1.2 Création des fonctions d’équilibrage

##### Modèles heuristiques SPT et RPW

Pour simplifier mon travail j’ai choisi de commencer par deux heuristiques classiques : **SPT (Shortest Processing Time)** et **RPW (Ranked Positional Weight)**. Ce choix s’est appuyé sur leur accessibilité : ces deux méthodes sont bien documentées, faciles à comprendre et à implémenter, ce qui permettait de valider rapidement la chaîne de traitement.

J’ai structuré chaque méthode dans une classe Python dédiée, à savoir *SptBalancing* et *RpwBalancing*, chacune prenant en entrée un dictionnaire de tâches (avec durée et précédences). Les classes implémentent des étapes communes : tri des opérations selon le critère choisi, affectation progressive aux postes en respectant le Takt Time, et gestion d’un seuil de tolérance. Ce découpage en classes m’a permis de clarifier la logique propre à chaque heuristique, tout en partageant certains traitements de base comme le calcul du poids positionnel cumulé ou la gestion des tâches fragmentées.

##### Notre Modèle FLB

Contrairement aux heuristiques l’implémentation de la méthode FLB nécessite une manipulation explicite de structures de graphe. En effet, la classe *MteBalancing* repose sur la création d’un *graphe orienté acyclique (DAG)* représentant les relations de précedence entre opérations. À l’aide de structures telles que **graph**, **nodes**, **queue** ou encore **deque**, le code construit et parcourt le graphe via un algorithme de tri topologique, garantissant le respect de l’ordre logique défini entre les tâches.

Cette structure algorithmique permet d'intégrer des conditions supplémentaires inspirées du modèle mathématique FLB, telles que *la fragmentation automatique* si  $TA_i > BF(1 + \varepsilon)$ , *la tolérance sur les temps de poste*, ou encore la possibilité de combiner plusieurs opérations courtes selon des critères comme *la machine utilisée* ou *la compétence opérateur*. Ces choix conditionnels ne sont pas présents dans les heuristiques classiques, et témoignent de la richesse de la logique FLB développée sur mesure dans ce projet.

### 3.1.3 Outils d'analyse et visualisation

#### Visualisation Yamazumi

Un diagramme Yamazumi est un graphique en colonnes empilées utilisé pour représenter visuellement la charge de travail par poste, en comparant les temps d'opérations affectés à chaque station par rapport au Takt Time.

Une fois les postes équilibrés créés à l'aide des différentes méthodes (SPT, RPW ou FLB), nous avons développé une fonction dédiée à la visualisation des résultats sous forme de diagrammes Yamazumi. Ces graphiques, largement utilisés dans les démarches Lean, permettent de visualiser pour chaque poste l'enchaînement des opérations ainsi que la charge cumulée par rapport au Takt Time.

La fonction `plot_all_methods_by_file(...)` génère automatiquement ces diagrammes en comparant les différentes méthodes d'équilibrage appliquées à un même fichier d'entrée. Chaque colonne représente un poste, avec des blocs empilés indiquant les durées des tâches. La ligne horizontale de référence correspond au Takt Time, ce qui rend immédiatement visibles les postes sous-chargés ou surchargés.

Cette étape s'est révélée essentielle pour valider visuellement la cohérence\* des affectations, identifier les déséquilibres\* éventuels, et proposer des ajustements ou comparaisons entre approches. Elle renforce l'utilité du modèle en le rendant plus lisible pour les utilisateurs finaux, même non techniques. \* : La cohérence et le déséquilibre sont deux indicateurs clés de qualité de

l'affectation, que nous analyserons plus en détail dans le chapitre suivant.

#### Comparatif des modèles

L'étude comparative entre les différentes méthodes d'équilibrage (SPT, RPW et FLB) a été menée à l'aide d'indicateurs quantitatifs calculés automatiquement à partir des fonctions d'équilibrage. Chaque méthode retourne deux KPI principaux : **Efficiency** et **Smoothness**.

Pour appliquer ces indicateurs sur un ensemble de fichiers, nous avons développé la fonction `compute_kpis_from_directory`, qui analyse automatiquement plusieurs fichiers de gamme présents dans un dossier et consolide les résultats. En complément, la fonction `export_tableau_comparatif` permet de générer un tableau Excel synthétique comparant les performances des trois méthodes sur chaque gamme.

Ce dispositif a permis de structurer une analyse comparative rigoureuse, appuyée à la fois par des résultats chiffrés et des visualisations.

#### Génération des rapports d'analyse

Pour faciliter la diffusion des résultats d'équilibrage auprès des utilisateurs finaux, nous avons intégré une fonction de génération automatique de rapports PDF. La fonction `generate_equilibrage_pdf_single_figure` permet de convertir les visualisations

Yamazumi en documents PDF clairs et lisibles, intégrant le titre de la gamme traitée, la méthode utilisée, la date de génération, ainsi qu'une légende explicative.

Le rapport ainsi généré est destiné à être fourni directement aux clients ou aux responsables d'atelier. Il contient une distribution précise et visuelle des tâches poste par poste, avec les références des opérations et les opérateurs associés, permettant une lecture immédiate de la répartition. Cette fonctionnalité permet de rendre l'outil FLB immédiatement exploitable dans un cadre professionnel.

## 3.2 Implémentation d'une solution web

### Choix des outils de création des interfaces

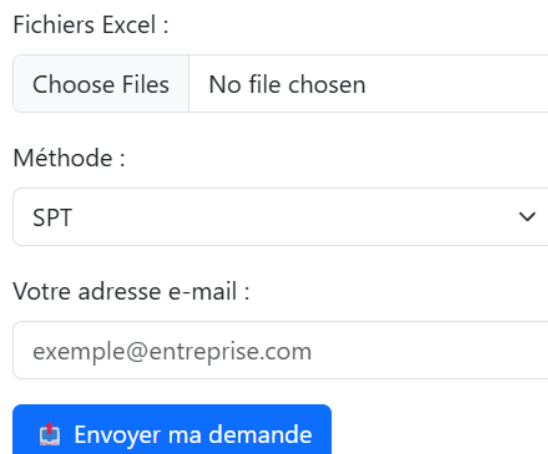
Au début du projet, j'avais prévu d'utiliser le framework **Django** pour développer l'application web. Cette solution présentait de nombreux avantages : gestion native des bases de données, sécurité renforcée, système de routage structuré et environnement complet pour organiser les fichiers de vues, modèles et formulaires. Cependant, en raison des *contraintes de temps* et de la nécessité de livrer un prototype fonctionnel rapidement, j'ai décidé de revenir vers **Flask**, un micro-framework plus léger et rapide à prendre en main.

### Construction du formulaire des demandes (espace client)

Pour permettre aux clients de soumettre une demande d'équilibrage de manière simple et intuitive, nous avons conçu un formulaire web en utilisant les technologies **HTML**, **CSS** et le framework **Bootstrap** pour assurer une interface claire, responsive et professionnelle.

L'interface comprend :

- ☐ une zone pour importer un fichier Excel contenant les données de gamme,
- ☐ un menu déroulant permettant de choisir la méthode d'équilibrage souhaitée (SPT, RPW, ou FLB),
- ☐ un champ pour saisir l'adresse email du client,
- ☐ un bouton « Demander » qui transmet l'ensemble des informations au serveur.



Fichiers Excel :

No file chosen

Méthode :

SPT ▼

Votre adresse e-mail :

exemple@entreprise.com

FIGURE 3.1 – Formulaire de demande pour client


L'animation légère et le design épuré ont été pensés pour rendre l'expérience fluide, même pour des utilisateurs non techniques.

## Implémentation des algorithmes et envoi des rapports (Admin)

Une fois la demande client soumise via le formulaire, le traitement complet est géré côté serveur, qui intègre le cœur du modèle d'équilibrage. Dès réception d'un fichier Excel et des paramètres associés (méthode choisie, email client), le serveur exécute automatiquement l'algorithme correspondant, génère le rapport PDF, puis prépare l'envoi.

Pour la partie communication, nous avons retenu les bibliothèques `smtplib` et `email.message` de Python, qui permettent un envoi sécurisé via un compte **Gmail** configuré avec *mot de passe d'application*. Ce système assure l'envoi du rapport PDF à l'adresse renseignée par le client contrôlé par l'administrateur.

Une interface dédiée à l'administration a été conçue pour gérer cette étape finale. Ce tableau de bord permet de visualiser les demandes entrantes, d'accéder aux fichiers générés, et de lancer manuellement ou automatiquement l'envoi des résultats. Elle complète l'interface, centrée sur la soumission client.

 **Requêtes Clients**

Date	Email Client	Nom du fichier	Méthode	Statut	Actions
2025-06-21 15:41	youssef.khalifa1@gmail.com	Equilibrage_61228.xlsx	MTE	Envoyé	<a href="#">PDF</a> <a href="#">Envoyer</a>
2025-06-21 15:45	youssef.khalifa@centrale-casablanca.ma	Equilibrage_79615.xlsx	RPW	Envoyé	<a href="#">PDF</a> <a href="#">Envoyer</a>
2025-06-21 16:02	youssef.khalifa1@gmail.com	Equilibrage60511.xlsx	MTE	Envoyé	<a href="#">PDF</a> <a href="#">Envoyer</a>
2025-06-21 16:07	youssef.khalifa1@gmail.com	Equilibrage60511.xlsx	MTE	Envoyé	<a href="#">PDF</a> <a href="#">Envoyer</a>
2025-06-21 16:21	peeka_leeka@outlook.com	Equilibrage_61228.xlsx	SPT	Envoyé	<a href="#">PDF</a> <a href="#">Envoyer</a>

FIGURE 3.2 – Tableau de gestion des demandes - pour Admin

## 3.3 Vers une automatisatisation intelligente par apprentissage automatique

Cette partie représente la troisième mission prévue dans le cadre du stage, axée sur l'exploitation de techniques d'apprentissage automatique pour enrichir et automatiser la démarche d'équilibrage. Faute de temps, cette étape n'a pas pu être finalisée à ce stade, mais un plan structuré a été amorcé.

L'objectif était de capitaliser sur les données générées via l'interface web (fichiers de gamme, paramètres choisis, résultats obtenus) pour constituer une base de données exploitable. Cette base aurait permis d'identifier, à l'aide de modèles de machine learning, les combinaisons de paramètres les plus efficaces selon les profils de gammes. L'enjeu était d'explorer les corrélations entre les caractéristiques des gammes (nombre d'opérations, dispersion des durées, machines impliquées) et les performances obtenues (efficacité, smoothness...), afin de guider automatiquement le choix de la méthode ou d'ajuster dynamiquement certains paramètres internes du modèle FLB.

# Chapitre 4

## Évaluation des résultats et analyse comparative des approches

### 4.1 Indicateurs de performance retenus

Deux indicateurs clés ont été retenus : **Efficiency** et **Smoothness**. Ils permettent de mesurer à la fois le taux de remplissage des postes et la régularité de la charge de travail, ce qui est essentiel pour assurer une ligne de production fluide, équilibrée et performante.

**1. Efficiency (Efficacité)** C'est le pourcentage d'utilisation du temps disponible sur l'ensemble des postes par rapport au temps total de production :

$$\text{Efficiency} = \frac{\sum_{i=1}^n t_i}{N \times TT} \times 100$$

où  $t_i$  est la durée de la tâche  $i$ ,  $N$  le nombre de postes créés, et  $TT$  le Takt Time. Un bon niveau d'efficacité reflète un remplissage optimal des postes. Une efficacité trop faible indique une sous-utilisation de la capacité, synonyme de gaspillage dans une logique Lean.

**2. Smoothness (Lissage)** Mesure l'écart entre les charges de chaque poste, en évaluant la dispersion autour du poste le plus chargé :

$$\text{Smoothness} = \sqrt{\sum_{j=1}^N (L_j - L_{\max})^2}$$

où  $L_j$  est la charge du poste  $j$  et  $L_{\max}$  la charge du poste le plus chargé. Une valeur faible indique une répartition équilibrée, ce qui limite les temps d'attente et les congestions.

**3. Déséquilibre (Balance Delay ou Line Imbalance)** Représente la proportion de temps non utilisé par rapport au temps total disponible sur la ligne :

$$\text{Déséquilibre} = \left( 1 - \frac{\sum_{i=1}^n t_i}{N \times TT} \right) \times 100$$

ou encore :  $\text{Déséquilibre} = 100 - \text{Efficiency}$  Cet indicateur met en évidence la part de capacité non exploitée dans l'équilibrage. Il est très utilisé dans l'industrie pour détecter les pertes liées aux postes sous-chargés ou au manque d'harmonisation.

#### 4. Autres indicateurs

- Nombre de postes créés
- Nombre des opérateurs inclus dans le travail
- Taux de polyvalence

## 4.2 Comparaison des résultats et interprétations

TABLE 4.1 – Performance de la méthode MTE (modèle FLB)

Gamme	Efficience (%)	Déséquilibre (%)
Equilibrage avec allure (3).xlsx	60.73	2.102
Equilibrage60511.xlsx	53.01	2.577
Equilibrage_61228(2).xlsx	49.15	1.500
Equilibrage_61228(3).xlsx	84.44	0.250
Equilibrage_61228.xlsx	48.50	1.485
Equilibrage_79615.xlsx	68.12	0.510

TABLE 4.2 – Performance de la méthode SPT

Gamme	Efficience (%)	Déséquilibre (%)
Equilibrage avec allure (3).xlsx	73.51	4.420
Equilibrage60511.xlsx	118.85	6.639
Equilibrage_61228(2).xlsx	120.00	2.249
Equilibrage_61228(3).xlsx	89.21	0.062
Equilibrage_61228.xlsx	120.00	2.206
Equilibrage_79615.xlsx	81.53	0.260

TABLE 4.3 – Performance de la méthode RPW

Gamme	Efficience (%)	Déséquilibre (%)
Equilibrage avec allure (3).xlsx	73.51	4.420
Equilibrage60511.xlsx	118.85	6.639
Equilibrage_61228(2).xlsx	120.00	2.249
Equilibrage_61228(3).xlsx	89.21	0.062
Equilibrage_61228.xlsx	120.00	2.206
Equilibrage_79615.xlsx	81.53	0.260

Globalement, les méthodes heuristiques SPT et RPW tendent à produire des taux d'efficience très élevés (souvent supérieurs à 100

À l'inverse, le modèle FLB (Flexible Line Balancing) présente des efficacités plus modérées (autour de 50–85

De plus, le FLB affiche des valeurs de déséquilibre (balance delay) nettement plus faibles, avec des smoothness réduits sur certaines gammes complexes. Cela témoigne d'un meilleur lissage des charges entre postes, essentiel pour assurer une ligne fluide, sans goulots ni surcharges.

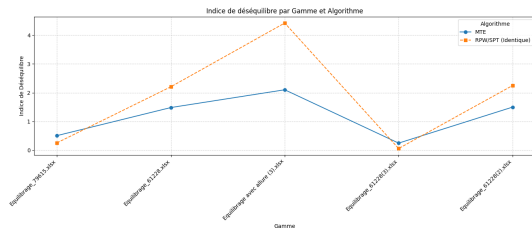


FIGURE 4.1 – Indice de déséquilibre par Gamme

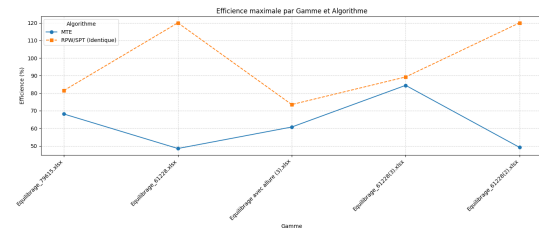


FIGURE 4.2 – Efficacité maximale par Gamme

Cette performance plus « humaine » et conforme à la réalité fait du FLB un modèle mieux adapté aux ateliers à forte variabilité, comme ceux du secteur textile, où les données sont souvent bruitées et les exigences de flexibilité très fortes.

### 4.3 Visualisations des résultats d'équilibrage

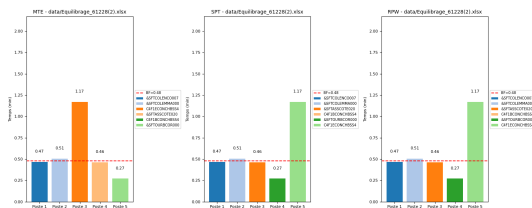


FIGURE 4.2 – Yamazumi 61228(2)

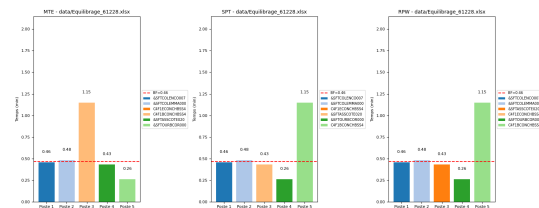


FIGURE 4.4 – Yamazumi 61228

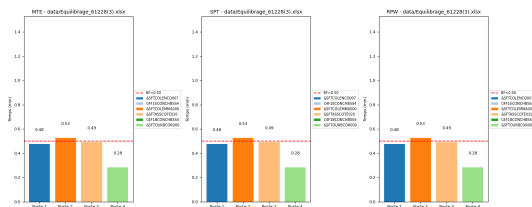


FIGURE 4.3 – Yamazumi 61228(3)

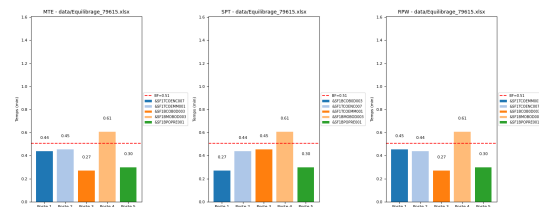


FIGURE 4.5 – Yamazumi 79615

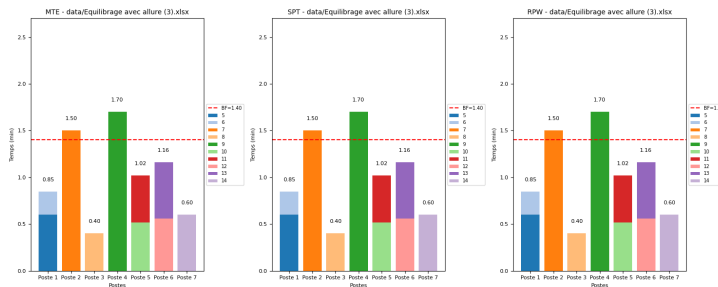


FIGURE 4.6 – Yamazumi allure 3

Afin de renforcer la lisibilité et l'interprétabilité des diagrammes Yamazumi, chaque opération est représentée par une couleur spécifique et constante, identifiée dans une légende commune à toutes les méthodes. Cette correspondance visuelle entre couleur et référence opérationnelle permet de retracer visuellement le parcours de chaque tâche à travers les différents postes, quelle que soit la méthode d'équilibrage utilisée (FLB, SPT, RPW).

Cette approche facilite la comparaison poste par poste, tout en mettant en évidence certains phénomènes : comme la fragmentation ou le regroupement d'opérations et la dispersion d'une même tâche sur plusieurs postes.



# Chapitre 5

## Perspectives d'amélioration et valorisation futures

### 5.1 Limites actuelles du modèle et de l'implémentation

Bien que le modèle FLB conçu dans le cadre de ce projet représente une avancée significative par rapport aux méthodes heuristiques classiques, plusieurs limites subsistent à différents niveaux — aussi bien du point de vue technique que conceptuel.

#### Limites techniques de l'implémentation

La première limite observée est liée aux performances de l'algorithme. Sur certains fichiers de gamme complexes, le temps de traitement devient relativement élevé. Cette latence est en partie due à la richesse conditionnelle du modèle FLB, mais constitue un frein dans un contexte industriel nécessitant des réponses rapides, notamment en cas de simulation multiple ou d'intégration dans une chaîne continue.

Une autre limite concerne l'écart partiel entre l'implémentation Python et le modèle mathématique établi. Certaines instructions théoriques n'ont pas pu être reproduites exactement dans le code, soit en raison de leur complexité algorithmique, soit pour des raisons de clarté fonctionnelle. Le résultat reste cohérent, mais des ajustements sont encore nécessaires pour aligner parfaitement la logique d'exécution sur la formulation théorique.

Par ailleurs, les rapports PDF générés automatiquement, bien qu'utiles pour une première visualisation, restent incomplets en termes de structure et de contenu. Ils n'intègrent pas encore de tableau récapitulatif complet, de commentaires analytiques sur les postes générés ou d'indicateurs de performance calculés dynamiquement.

Enfin, l'interface web mise en place ne peut pas encore être considérée comme prête pour un déploiement commercial. Bien qu'elle permette le traitement automatique et l'envoi par mail, elle manque de certaines fonctionnalités clés pour un usage en entreprise : gestion des comptes, sécurité renforcée, traçabilité des demandes, ou encore hébergement sur serveur distant.

#### Limites du modèle FLB lui-même

Le modèle FLB, dans sa version actuelle, présente également certaines limites intrinsèques. Il ne prend pas encore en considération des contraintes supplémentaires souvent rencontrées dans les environnements industriels réels, telles que les temps de déplacement entre opérations, les pauses opérateurs, les niveaux de compétence croisée, ou encore les priorités de fabrication. Intégrer ces facteurs permettrait d'améliorer la robustesse du modèle face à des situations de production plus complexes.

En parallèle, l'évaluation comparative n'a été conduite qu'à l'aide de deux heuristiques : SPT et RPW. Bien qu'elles soient couramment utilisées, cette comparaison reste

partielle. Un enrichissement de l'analyse serait possible à travers l'intégration d'autres approches existantes dans la littérature (COMSOAL, Kilbridge Wester), ou même via des méthodes issues de l'intelligence artificielle comme les métaheuristiques ou la programmation par contraintes, qui ouvriraient la voie à une optimisation plus fine et plus dynamique.

## 5.2 Axes d'amélioration technique et scientifique

Dans la continuité du travail réalisé, plusieurs pistes d'amélioration ont été identifiées, tant sur le plan technique que scientifique. Celles-ci visent à renforcer la performance du modèle, à élargir sa portée, et à le rapprocher davantage des contraintes réelles du terrain industriel.

Sur le plan technique, la priorité est d'optimiser l'efficacité algorithmique du modèle FLB. Une analyse approfondie de la complexité des boucles et des structures de données utilisées permettrait de réduire les temps de traitement, notamment pour les gammes comprenant un grand nombre d'opérations. L'introduction de structures plus performantes, comme des graphes orientés pondérés ou des files de priorité, pourrait accélérer les traitements tout en conservant la logique actuelle du modèle.

Par ailleurs, le moteur de génération de rapports PDF peut être enrichi pour proposer une sortie plus détaillée et plus exploitable. Cela inclurait l'ajout de tableaux d'affectation, d'indicateurs de performance, d'analyses comparatives intégrées, ainsi que la possibilité d'exporter des versions personnalisées selon les profils utilisateurs (responsable méthode, chef d'équipe, direction...).

Côté scientifique, l'amélioration du modèle passe par l'intégration de nouvelles contraintes métier. Il serait pertinent d'introduire la gestion des niveaux de compétence (polyvalence opérateurs), la prise en compte de l'enchaînement machine, ou encore la compatibilité temporelle entre certaines tâches. Ces éléments permettraient au modèle d'être appliqué dans des environnements de production plus variés, et dans des contextes où les décisions sont fortement influencées par des facteurs humains et matériels.

Enfin, l'extension du comparatif à d'autres méthodes d'équilibrage reste un axe majeur. Intégrer des approches comme COMSOAL, Kilbridge & Wester ou encore des techniques basées sur les métaheuristiques (recuit simulé, colonies de fourmis, etc.) permettrait d'élargir le champ de comparaison et de positionner plus précisément les forces et les limites du modèle FLB dans la littérature existante.

Ces axes d'évolution sont autant de points d'appui pour faire du modèle développé une solution plus robuste, plus réaliste et potentiellement exploitable à grande échelle dans l'industrie textile ou d'autres secteurs manufacturiers.

## 5.3 Opportunités de valorisation et d'extension dans l'industrie

Le modèle FLB développé dans ce projet, ainsi que son implémentation logicielle, présentent un fort potentiel de valorisation à plusieurs niveaux. En effet, au-delà de l'intérêt académique et méthodologique, cette solution peut être exploitée dans des contextes industriels réels, et faire l'objet d'un déploiement progressif sous différentes formes.

D'un point de vue opérationnel, l'outil peut être proposé comme un service d'assistance à l'équilibrage pour les industriels du textile. En améliorant l'interface utilisateur et en renforçant la stabilité du système, il serait envisageable de proposer une version hébergée de la solution, accessible via une plateforme web sécurisée. Ce service permettrait aux entreprises de soumettre leurs fichiers de gamme et d'obtenir en retour des répartitions optimisées, des visualisations explicites, et des recommandations adaptées.

En parallèle, le projet présente un potentiel de valorisation sous forme de solution logicielle dédiée. Une interface complète, enrichie de modules de paramétrage, de tableaux de bord et de fonctions collaboratives, pourrait être développée dans une logique produit. Une telle solution pourrait intéresser non seulement les industriels du textile, mais aussi d'autres secteurs reposant sur l'assemblage séquentiel (automobile, électronique, ameublement...).

Ce travail peut également constituer une base solide pour un projet de *startup technologique*, positionné sur la digitalisation intelligente des opérations industrielles. L'intégration du machine learning, la personnalisation des équilibres selon les préférences réelles des ateliers, ou encore l'exploitation de données historiques ouvrent la voie à une industrialisation intelligente et flexible.

Enfin, le modèle FLB pourrait être mobilisé dans des projets de recherche appliquée ou collaboratifs, en partenariat avec des laboratoires ou des entreprises, dans le cadre de financements nationaux ou internationaux autour de la transformation numérique, de l'industrie 4.0 ou de la logistique intelligente.

# Conclusion Générale

Ce stage a constitué une première immersion concrète dans le domaine de la recherche appliquée, à l'interface entre modélisation mathématique, algorithmique et transformation industrielle. Il m'a permis de découvrir en profondeur les problématiques liées à l'équilibrage des lignes de production, en particulier dans le secteur textile, tout en mobilisant des compétences transversales allant de l'analyse scientifique à la conception logicielle.

Le modèle FLB (Flexible Line Balancing) que nous avons développé constitue une réponse originale aux limites des approches heuristiques traditionnelles. Il intègre des logiques plus réalistes, en tenant compte des durées de tâche, des contraintes de précédence, du Takt Time, mais aussi de paramètres de flexibilité rarement exploités dans les outils standards. L'implémentation numérique du modèle, ainsi que la mise en place d'une interface web fonctionnelle et d'une chaîne de traitement automatisée, démontrent la faisabilité technique d'une solution complète et reproductible.

Au-delà des résultats obtenus, ce projet a mis en lumière plusieurs axes d'amélioration et de valorisation. L'enrichissement du modèle, l'optimisation des performances, l'élargissement du comparatif méthodologique, ou encore le renforcement de l'interface utilisateur sont autant de perspectives envisageables à court et moyen terme. À plus long terme, la solution pourrait donner lieu à des projets de recherche, d'industrialisation ou même de création d'entreprise, autour de la digitalisation intelligente des systèmes de production.

Ce stage a représenté pour moi une expérience à la fois formatrice, stimulante et engageante, me permettant d'approfondir mes connaissances en modélisation et en développement, tout en développant une vision plus concrète des enjeux de performance industrielle et d'innovation numérique.

# Bibliographie

- Improvement of Assembly Line Efficiency by Using Lean Manufacturing Tools and Line Balancing Techniques
- Skill Requirement Analysis at the Production Floor in Readymade Garment Industry (Mentionné deux fois dans le document)
- A Decision-Making Model Based on Fuzzy Logic to Support Maintenance Strategies and Improve Production Lines Productivity and Availability
- Mathematical Model for Dynamic Cell Formation in Fast Fashion Apparel Manufacturing Stage
- Mixed-Integer Linear Programming (MILP) for Garment Line Balancing
- Optimized Model Formulation Through Product Mix Scheduling for Profit Maximization in the Apparel Industry
- Productivity Improvement Through Lean Manufacturing Tools in Ethiopian Garment Manufacturing Company
- Application of Fuzzy Failure Mode and Effect Analysis to Investigate Lean Wastes in the Sewing Section
- Tri typologique (Pseudo-code partagé par le tuteur)
- Ordres de fabrication des gammes (partagés par le tuteur)

# Annexes

- Lien repository dans Github
- Lien Google Colab pour le code python
- Lien de l'espace OneDrive de travail

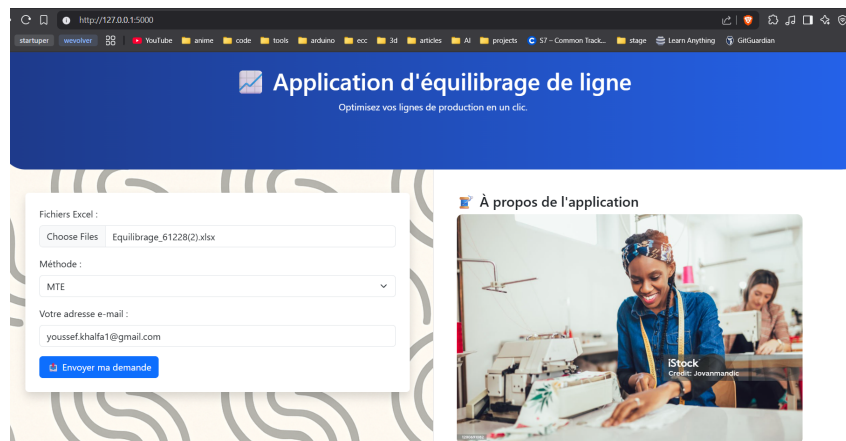


FIGURE 5.1 – Interface de l'espace client



FIGURE 5.2 – Exemple du rapport PDF généré

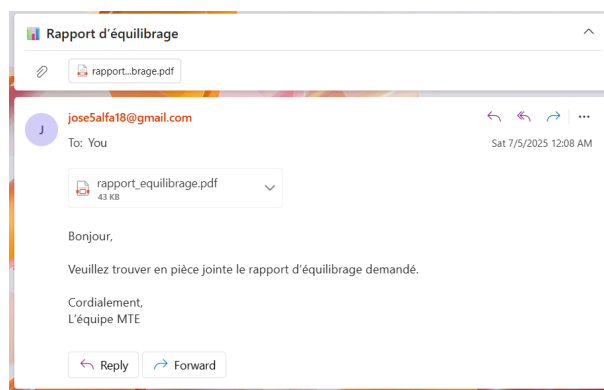


FIGURE 5.3 – Reception du rapport sur e-mail (Gmail)