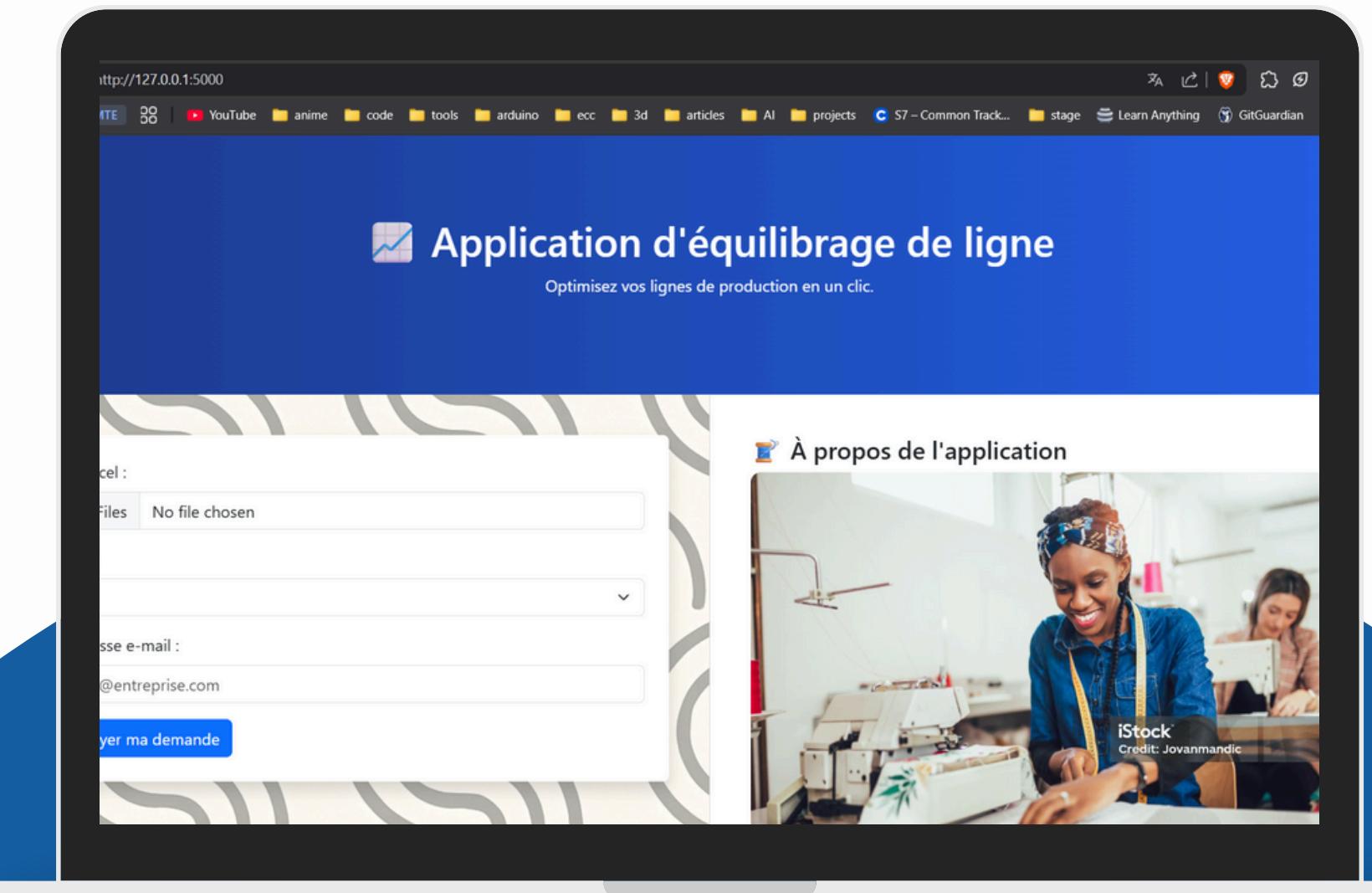


# FLB Garment Production Line Balancing

Présenté par: KHALFA Youssef

Encadré par: Mr MOULOUD AbdelFattah

Le 15/07/2025



# Résumé

- Introduction & contexte 01
- Recherche scientifique 03
- Modèle FLB (MTE) 04
- Implémentation numérique 05
- Résultats comparés 06
- Perspectives & valorisation 09
- Conclusion & remerciements 10



# Présentation de l'entreprise

L'ESITH (École Supérieure des Industries du Textile et de l'Habillement)

- Grande école d'ingénieurs publique, fondée en 1996 via un partenariat public-privé entre l'État et l'Association marocaine des industries du textile et de l'habillement
- Localisée à Casablanca, centre national de formation et de R&D dans le domaine textile

Laboratoire ; recherche et développement

- Accrédité **ISO 17025**, référence nationale pour les analyses, essais et contrôles dans le secteur textile
- Expertise technologique et organisationnelle
- Contrôle qualité, logistique, études de marché
- Soutien à la R&D : accompagnement des entreprises vers l'**Industrie 4.0**





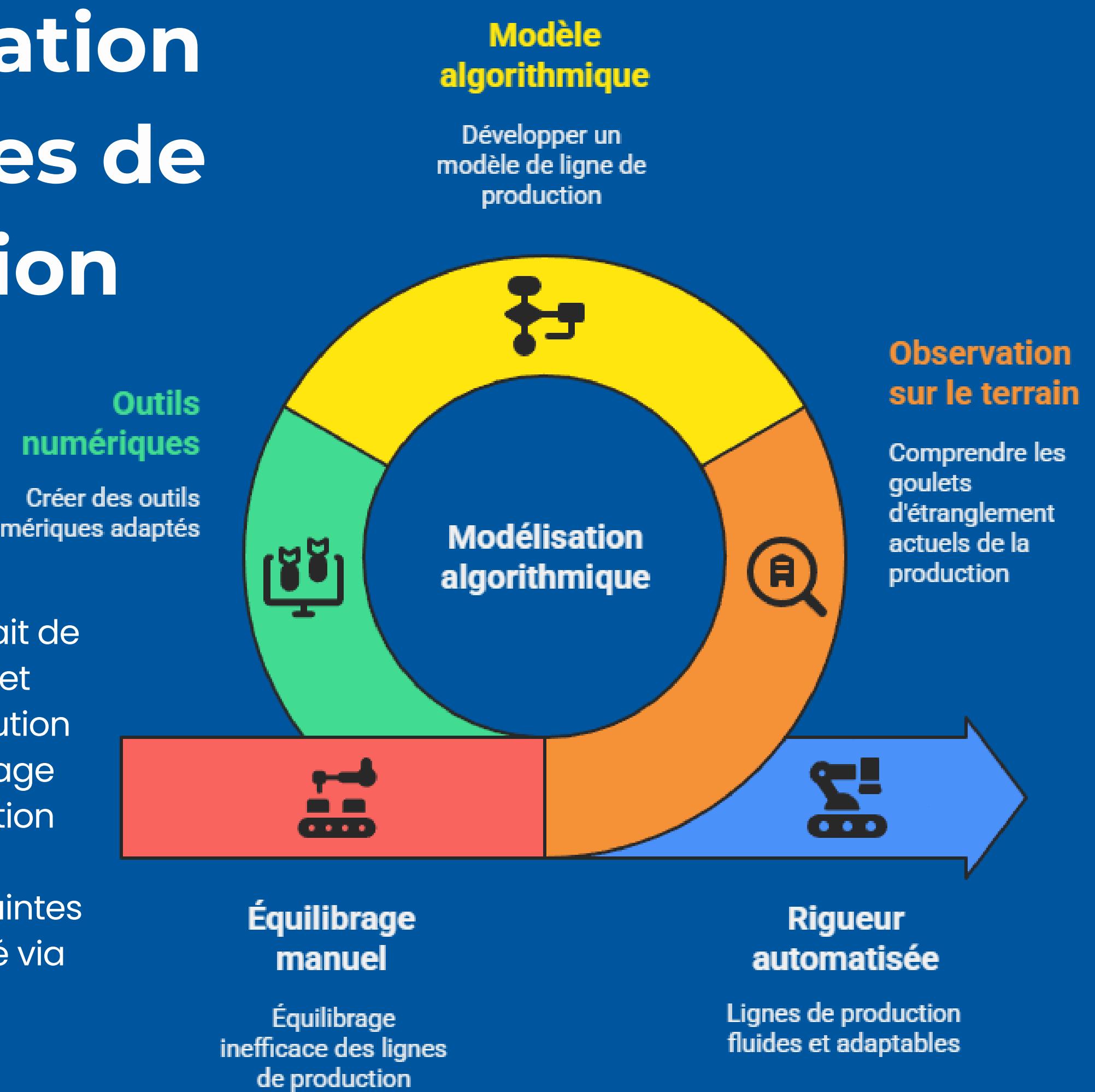
# Introduction

Dans le secteur textile en mutation, l'optimisation des lignes de production reste un défi majeur face aux méthodes encore largement manuelles. Ce stage développe une approche automatisée combinant analyse terrain, modélisation algorithmique et outils numériques adaptés aux réalités industrielles.

**Comment répartir efficacement les opérations d'une ligne textile entre les différents postes, tout en respectant les contraintes de précédence, les temps opératoires, et la capacité réelle des opérateurs ?**

# Optimisation des lignes de production textile

L'objectif du stage était de concevoir, modéliser et implémenter une solution numérique d'équilibrage des lignes de production textile, alliant rigueur algorithmique, contraintes terrain et accessibilité via une interface web.

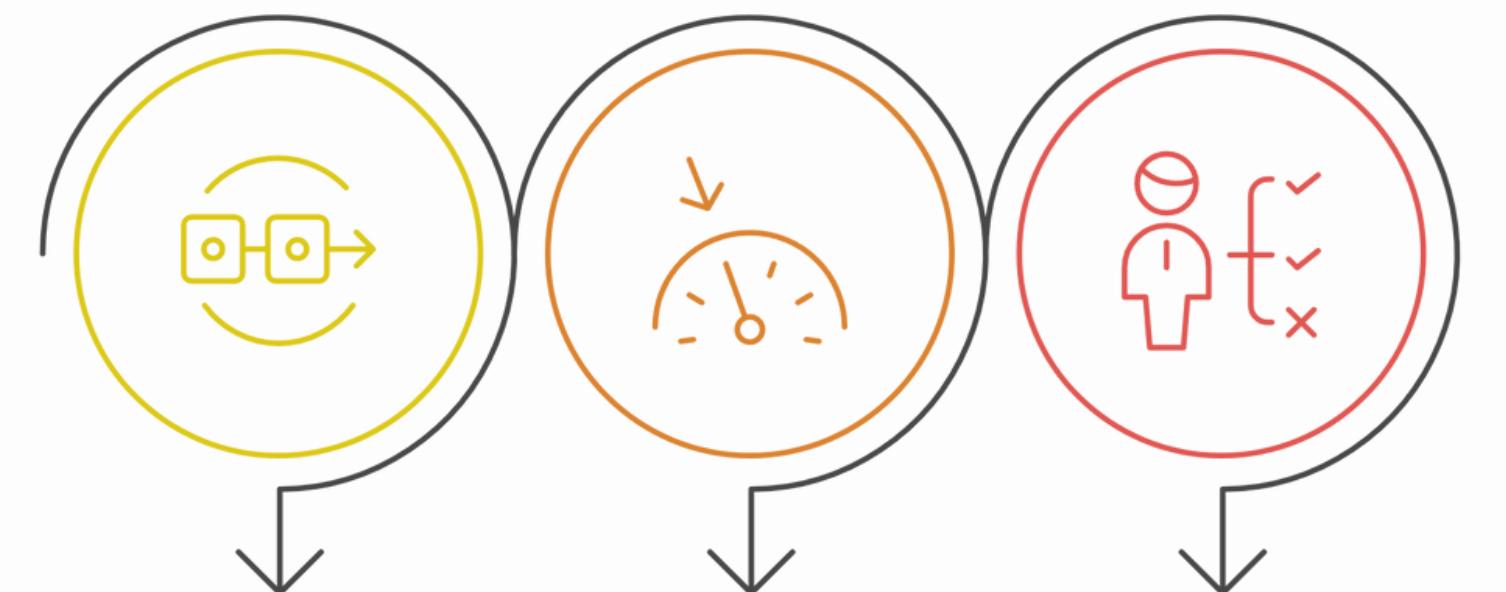


# Modèle FLB (MTE)

Le modèle MTE a été conçu pour répondre aux limites des approches heuristiques classiques en équilibrage de ligne textile.

Le modèle introduit également une fragmentation automatique des tâches trop longues ( $TA > BF \times (1+\varepsilon)$ ), afin de les répartir sur plusieurs postes.

L'affectation finale se fait de manière progressive : chaque opération est placée sur le premier poste compatible, en respectant à la fois la contrainte de temps, les dépendances, et les regroupements possibles avec d'autres tâches.



Décomposer les opérations longues dépassant un seuil.

Autoriser de légers dépassements du Takt Time sans déséquilibre.

Assigner les opérations en fonction de la compatibilité et de la précédence.



# Modèle FLB (MTE)

## 1. Initialisation

On prépare les structures en attribuant à chaque tâche un degré d'entrée (nbr de préds), et on initialise les dates de début et de fin à zéro.

## 2. Construction du graphe

On parcourt les dépendances entre tâches pour construire le graphe des précédences, en comptant les liens entrants pour chaque nœud.

## 3. Tri topologique (Kahn)

On détermine un ordre d'exécution logique en traitant les tâches sans prédécesseur, puis en les retirant progressivement tout en mettant à jour les suivants.

## 4. Calcul des dates

On calcule les dates de début et de fin de chaque tâche selon l'ordre topologique, en prenant la date de fin la plus tardive parmi les prédecesseurs.

## 5. Résultat final

On affiche ou exporte les dates  $D(i), F(i)$  pour chaque tâche, constituant la base de l'affectation aux postes dans le modèle MTE.

## Tri topologique

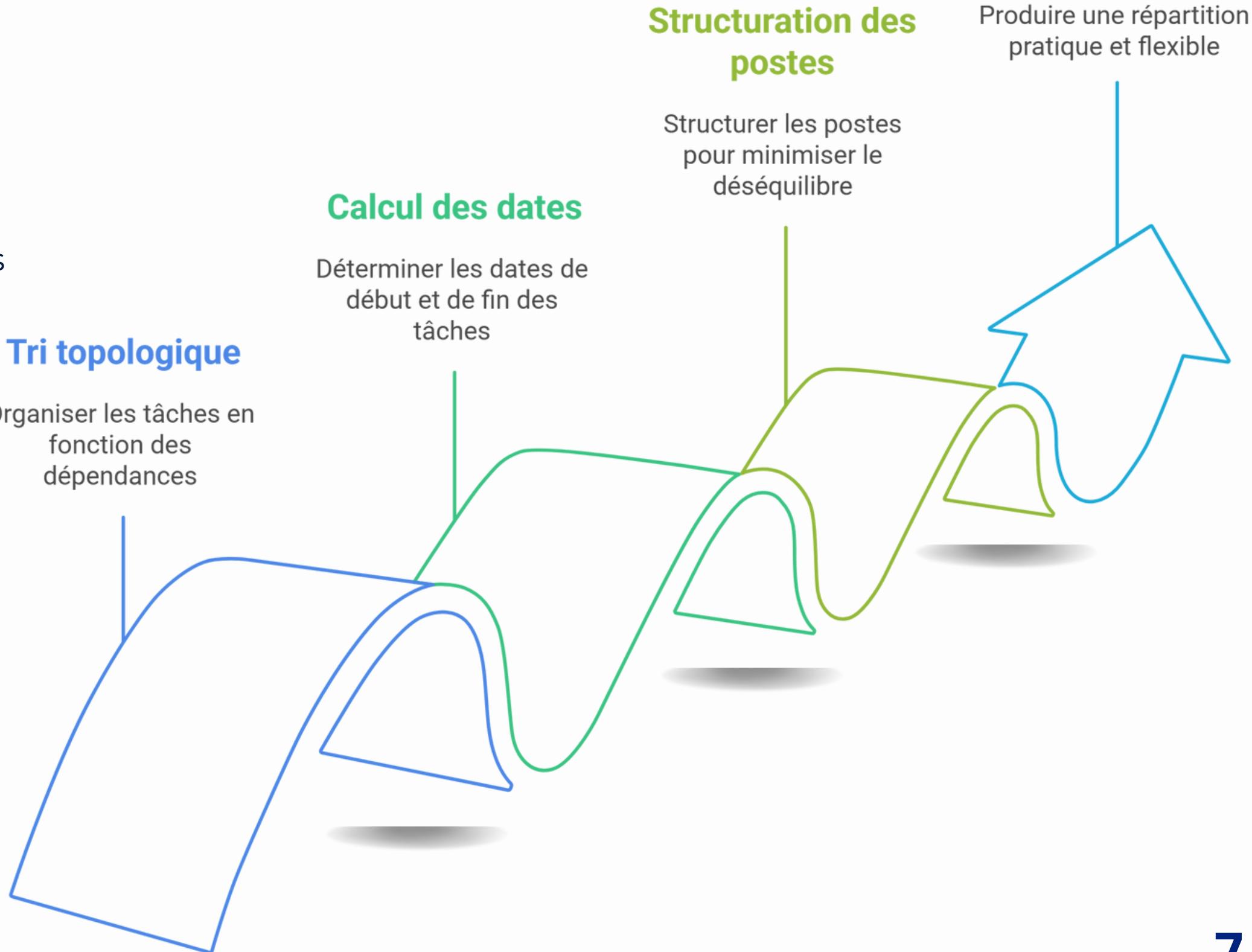
Organiser les tâches en fonction des dépendances

## Calcul des dates

Déterminer les dates de début et de fin des tâches

## Structuration des postes

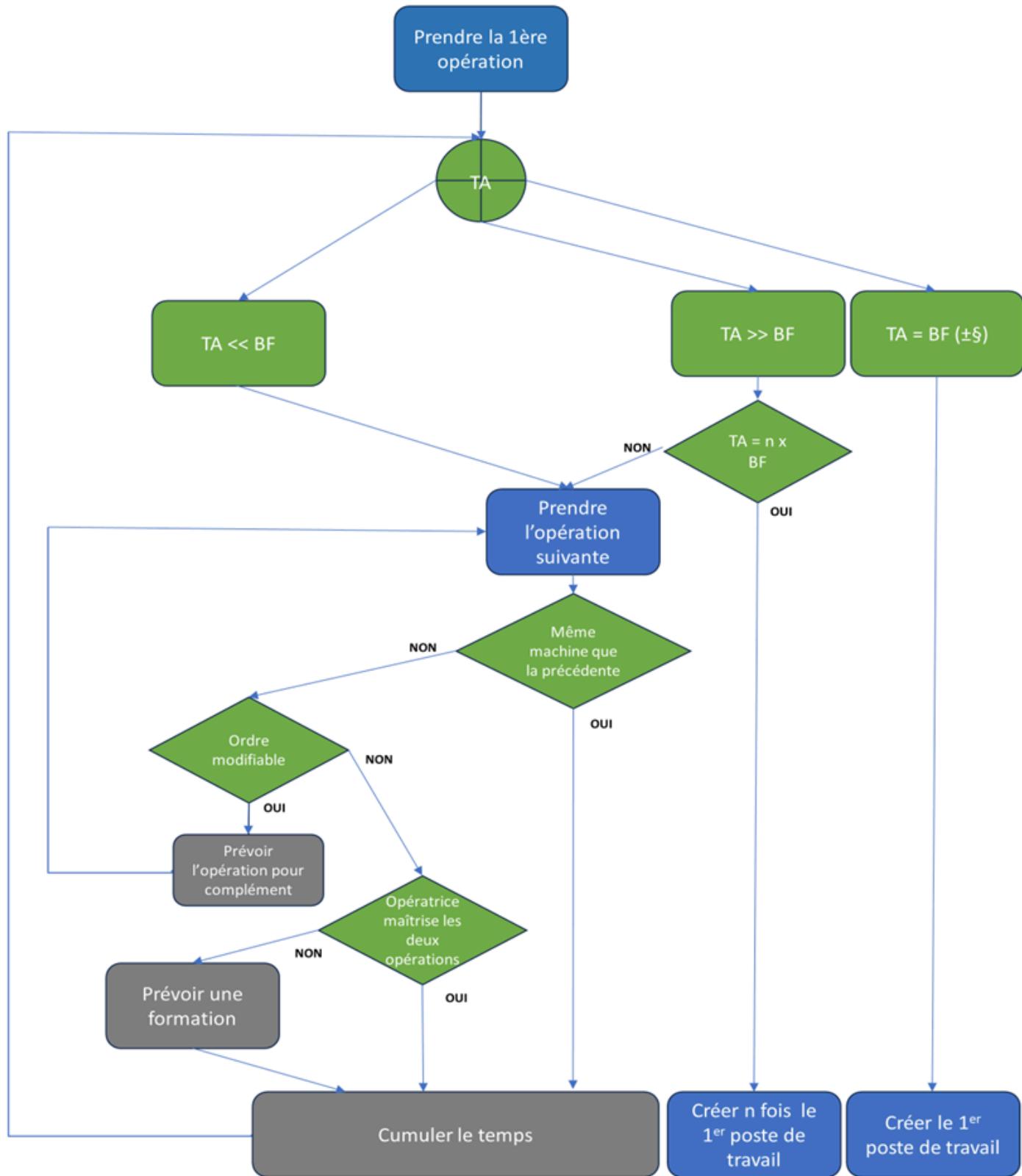
Structurer les postes pour minimiser le déséquilibre



## Répartition réaliste

Produire une répartition pratique et flexible

# Architecture du modèle



# Modèle mathématique

## Fragmentation

Si  $t_i > BF(1 + \varepsilon)$ ,  $k_i = \left\lceil \frac{t_i}{BF} \right\rceil$ ,  $t_i^{(k)} \approx \frac{t_i}{k_i}$

## Fonction objectif

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

$$\text{ou } \min \max_j \left( \sum_i t_i x_{ij} \right)$$

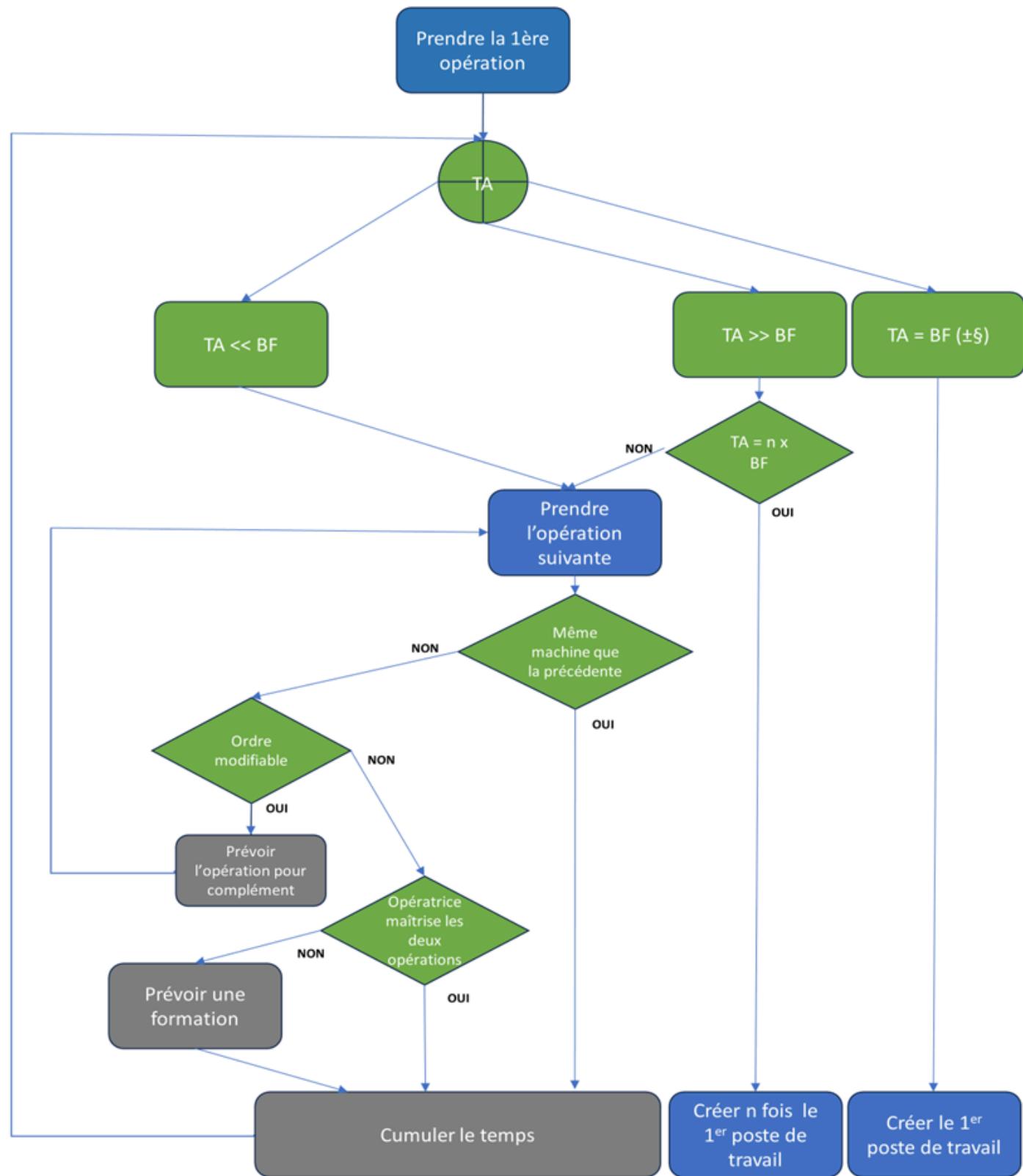
## Variables de décision

$x_{ij} \in \{0, 1\}$  (1 si la tâche  $i$  est affectée au poste  $j$ )

$S_i$  : date de début de la tâche  $i$

$F_i = S_i + t_i$  : date de fin

# Architecture du modèle



# Modèle mathématique

## Contraintes

$$\sum_j x_{ij} = 1 \quad \forall i \quad (\text{affectation unique})$$

$$S_i \geq F_k \quad \forall k \in P_i \quad (\text{précédence})$$

$$F_i = S_i + t_i \quad \forall i \quad (\text{définition des dates})$$

$$\sum_i t_i x_{ij} \leq BF(1 + \varepsilon) \quad \forall j \quad (\text{tolérance})$$

$$S_{i(k+1)} \geq F_{i(k)} \quad (\text{ordre des sous-tâches})$$

## Données

$$T = \{1, 2, \dots, n\} \quad (\text{ensemble des tâches})$$

$t_i$  : durée de la tâche  $i$

$P_i$  : ensemble des prédécesseurs de  $i$

$m$  : nombre de postes

$BF$  : Takt Time (temps de cycle)

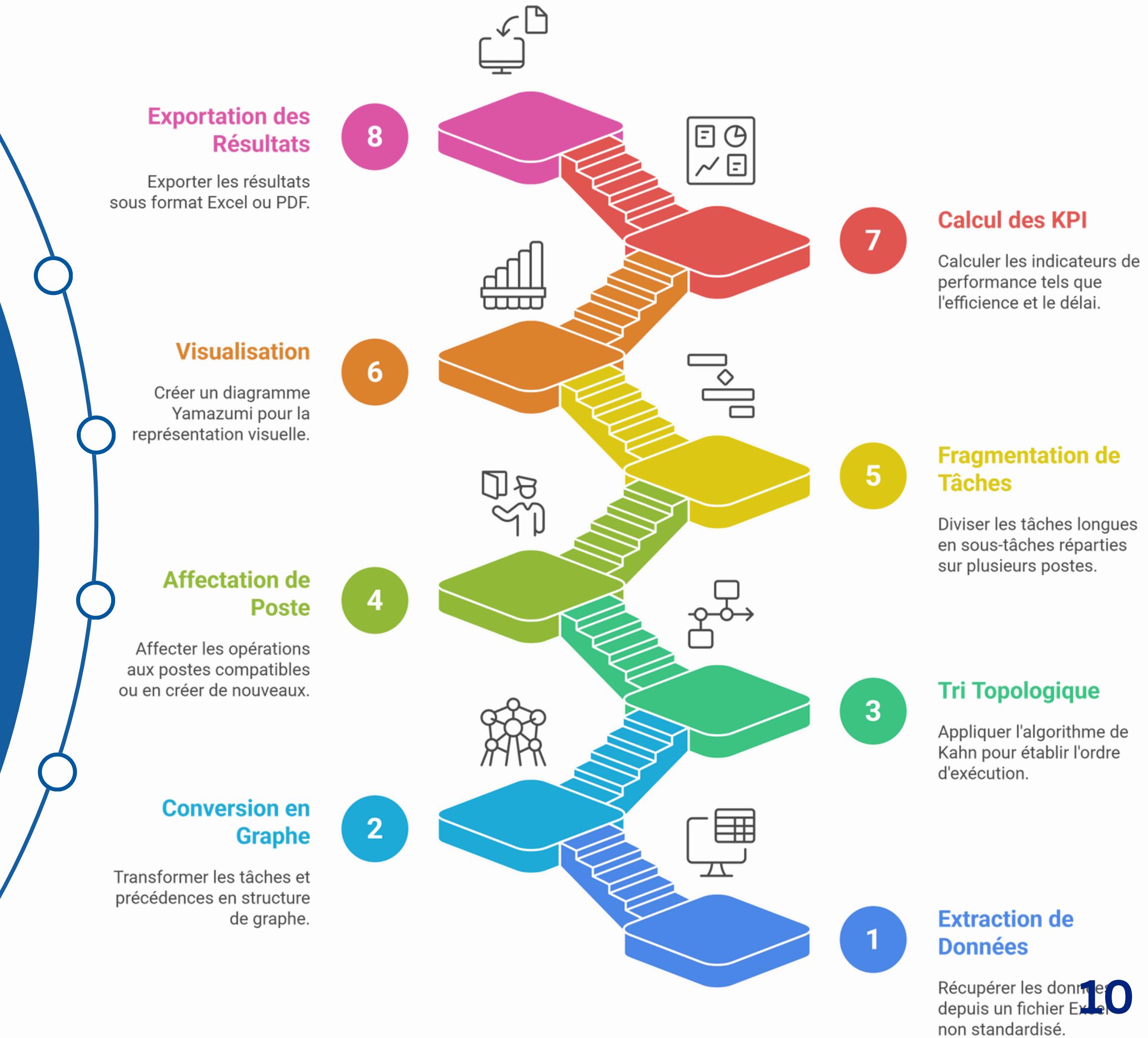
$\varepsilon \in [0, 1]$  (tolérance admissible)

# Implémentation numérique du modèle MTE

Le modèle a été entièrement implémenté en **Python**, en intégrant toutes les logiques du modèle mathématique .

Chaque étape de l'algorithme a été codée sous forme de classe réutilisable, structurée et documentée.

- extrait les données depuis un fichier Excel non standardisé
- applique un tri topologique
- affecte chaque opération au premier poste compatible, ou en crée un nouveau si nécessaire ;
- fragmente automatiquement les tâches en sous-tâches.



# Ressources en entrée

Le développement s'est appuyé sur une grande variété de ressources combinant données terrain, apports pédagogiques et recherche personnelle.

Enfin, une visite au sein de l'entreprise Groupe Filmod m'a permis d'observer concrètement l'organisation des lignes textiles, de mieux comprendre les contraintes métiers, et d'enrichir la modélisation avec des réalités opérationnelles.



## Fichiers Excel

Informations sur les ordres de fabrication pour des articles réels.



## Modèles heuristiques

Implémentations Python des méthodes SPT et RPW.



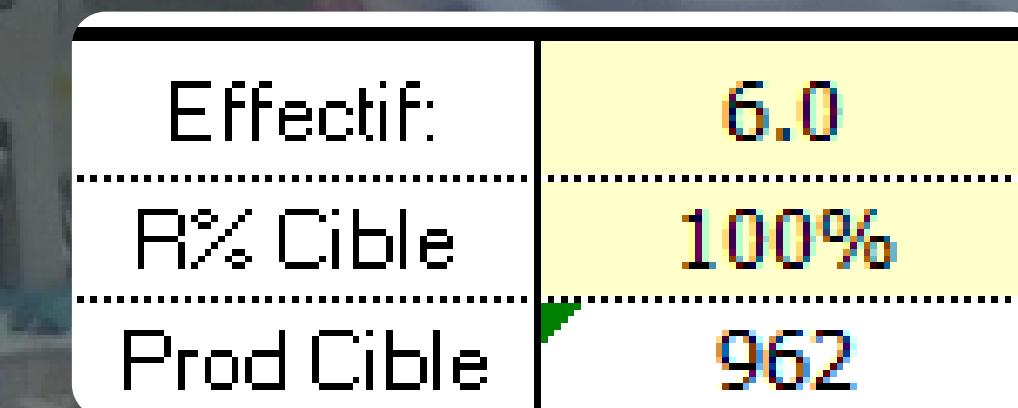
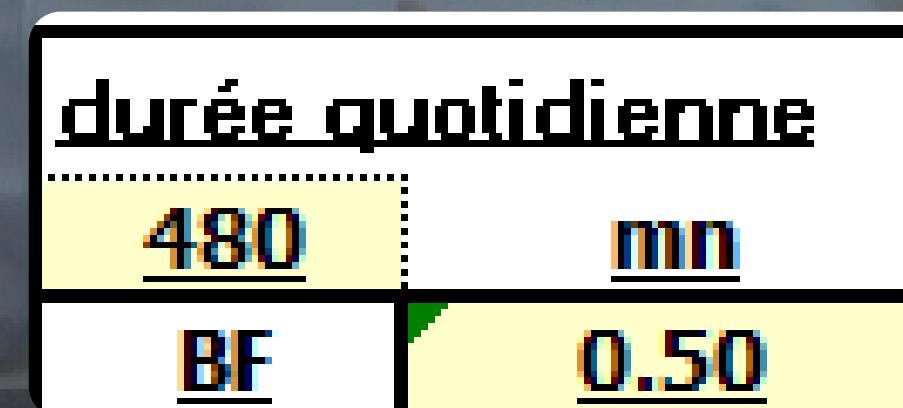
## Profils des opérateurs

Données sur l'ancienneté, la polyvalence, les formations, les taux de maîtrise.



## Paramètres industriels

Takt Time, effectif, rendement cible, tolérance, taux de rotation.



## Paramètres Clé

Opération	POSTE	Machine	Prédecesseurs	TA
coller le encor. Devr et cor couper prévoir dans la	&SFTCOLENCO007	\$COL-2AIG		0.477
ter emmanchure+bretelle avec	&SFTCOLEMMMA000	\$COL-2AIG	&SFTCOLENCO007	0.527
assembler côtés+vignette	&SFTASSCOTE020	\$SURJ-3F	&SFTCOLENCO007, &SFTCOLE	0.491
ourler TS invisible en rond	&SFTOURBCOR000	\$OURL-2F-INV	&SFTCOLENCO007, &SFTASSC	0.285
age-pliage-condit.selectif stand	C4F1BCONCHBSS4	MAIN	&SFTCOLEMMMA000, &SFTCOL	
age-pliage-condit.selectif stand	C4F1ECONCHBSS4	MAIN	&SFTCOLENCO007	
age-pliage-condit.selectif stand	C4F1JCONCHBSS4	MAIN	&SFTCOLEMMMA000	1.213
<b>Total</b>	<b>VT</b>			<b>3.0</b>

Exemple d'une gamme de production

# Résultats et livrables

Gamme	MTE - Efficience	MTE - Déséquilibre
Equilibrage_61228.xlsx	48.5	1.485
Equilibrage_61228(2).xlsx	49.15	1.5
Equilibrage avec allure (3).xlsx	60.73	2.102
Equilibrage_61228(3).xlsx	84.44	0.25
Equilibrage60511.xlsx	53.01	2.577
Equilibrage_79615.xlsx	68.12	0.51

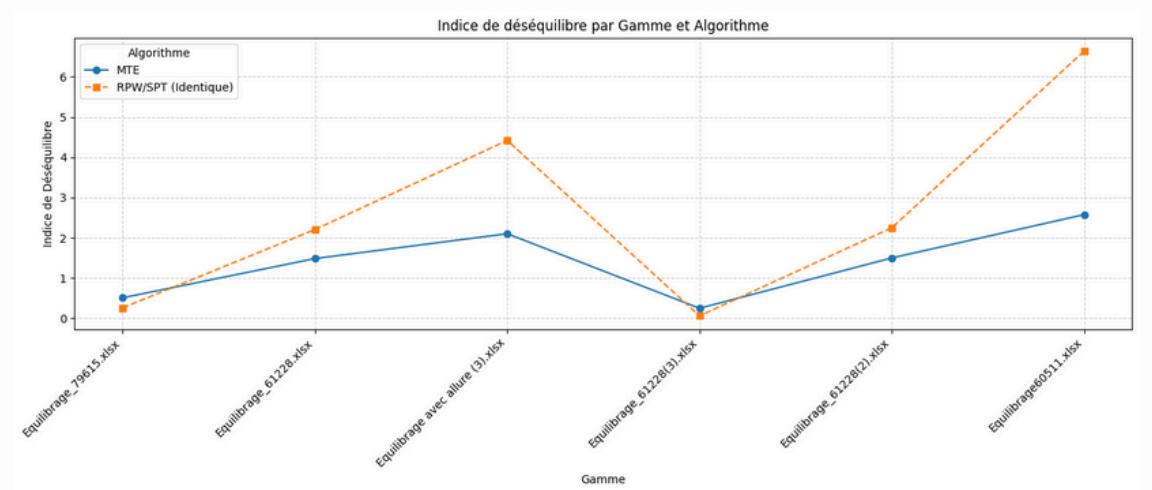
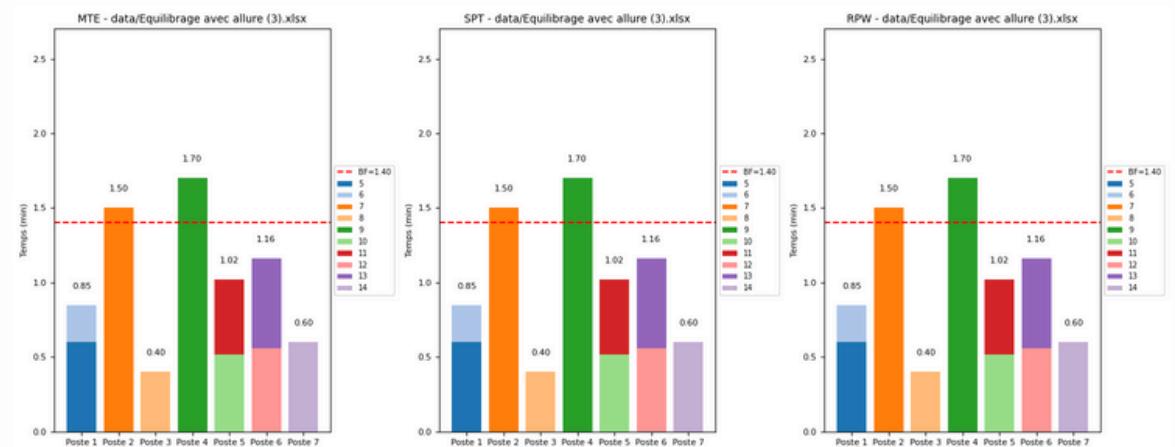
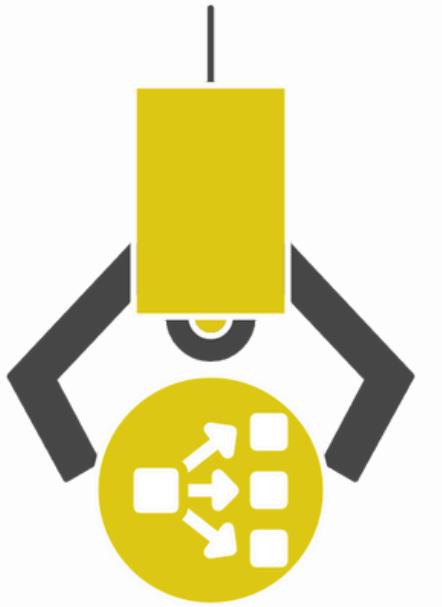


Tableau de répartition des tâches

Équilibrage clair pour chaque méthode avec affectation poste-opérations-temps.



Diagrammes Yamazumi

Visualisation graphique empilée des temps de chaque poste par méthode.

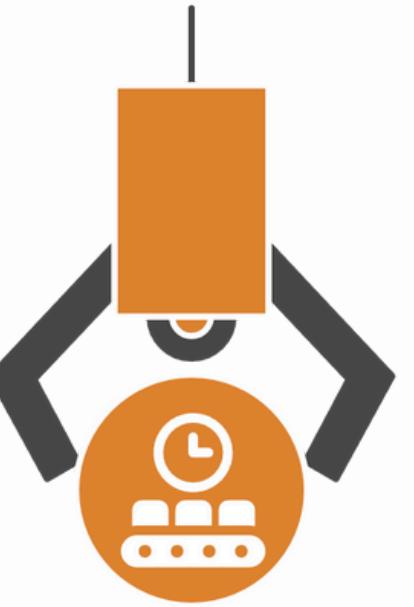


Tableau comparatif des méthodes

MTE vs SPT vs RPW avec indicateurs clés.



Rapport PDF automatisé

Généré à partir de l'application, incluant les visualisations et les données d'équilibrage.



# Analyse comparative

Les méthodes SPT et RPW affichent des efficacités très élevées, parfois supérieures à 100 %, ce qui est mathématiquement incohérent. Ce phénomène s'explique par une formulation algorithmique qui ignore certains effets cumulés.

48%-84%

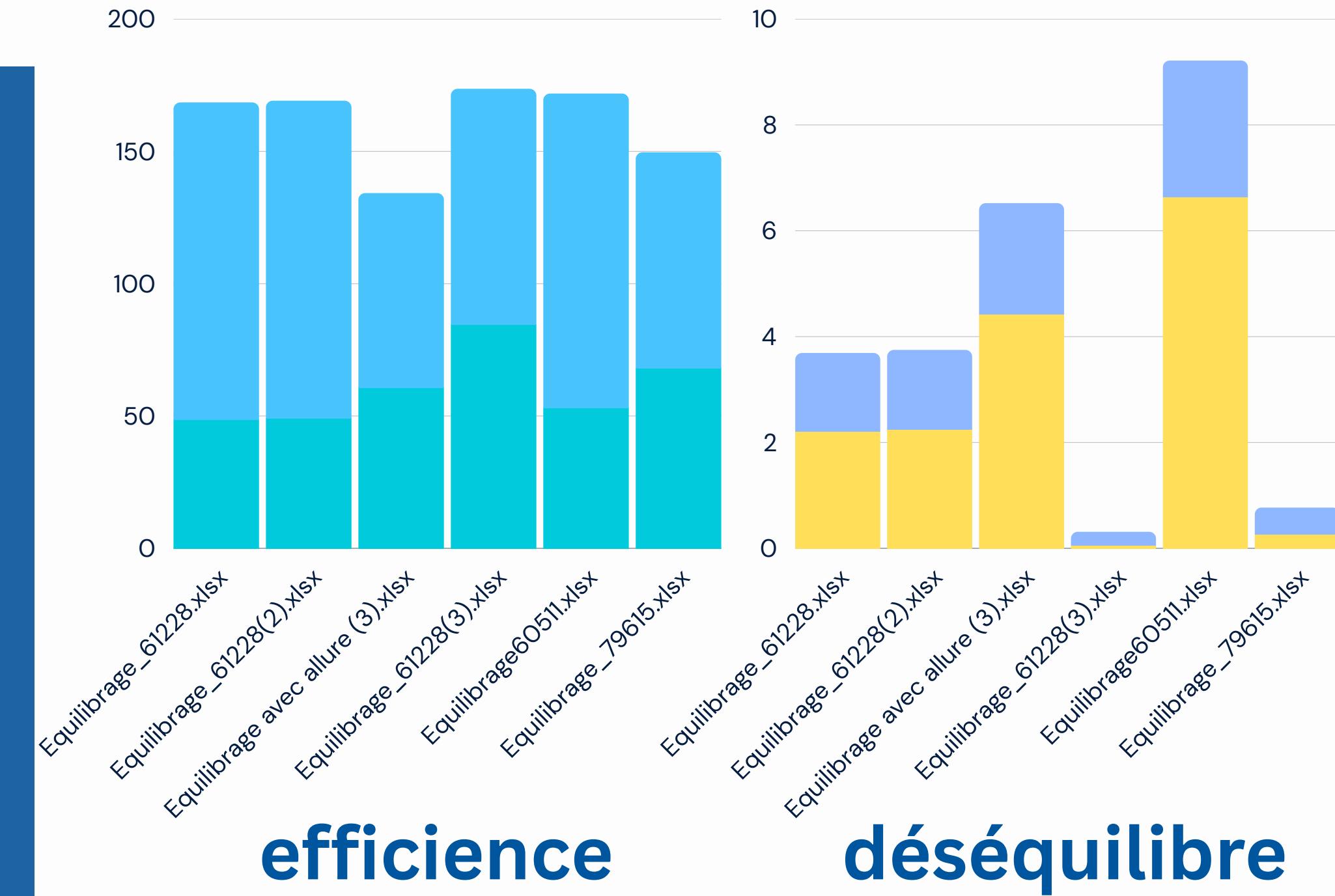
Efficiency

25%

déséquilibre

Realiste

Calculs des KPI  
à reconstruire!



efficiency

déséquilibre

la méthode MTE produit une efficience plus modérée mais plus réaliste, avec des valeurs comprises entre 48 % et 84 %.

Le modèle MTE affiche les déséquilibres les plus faibles (ex.: seulement 0,25 % sur 61228(3)), ce qui indique une répartition plus fluide et mieux calibrée des charges entre postes.

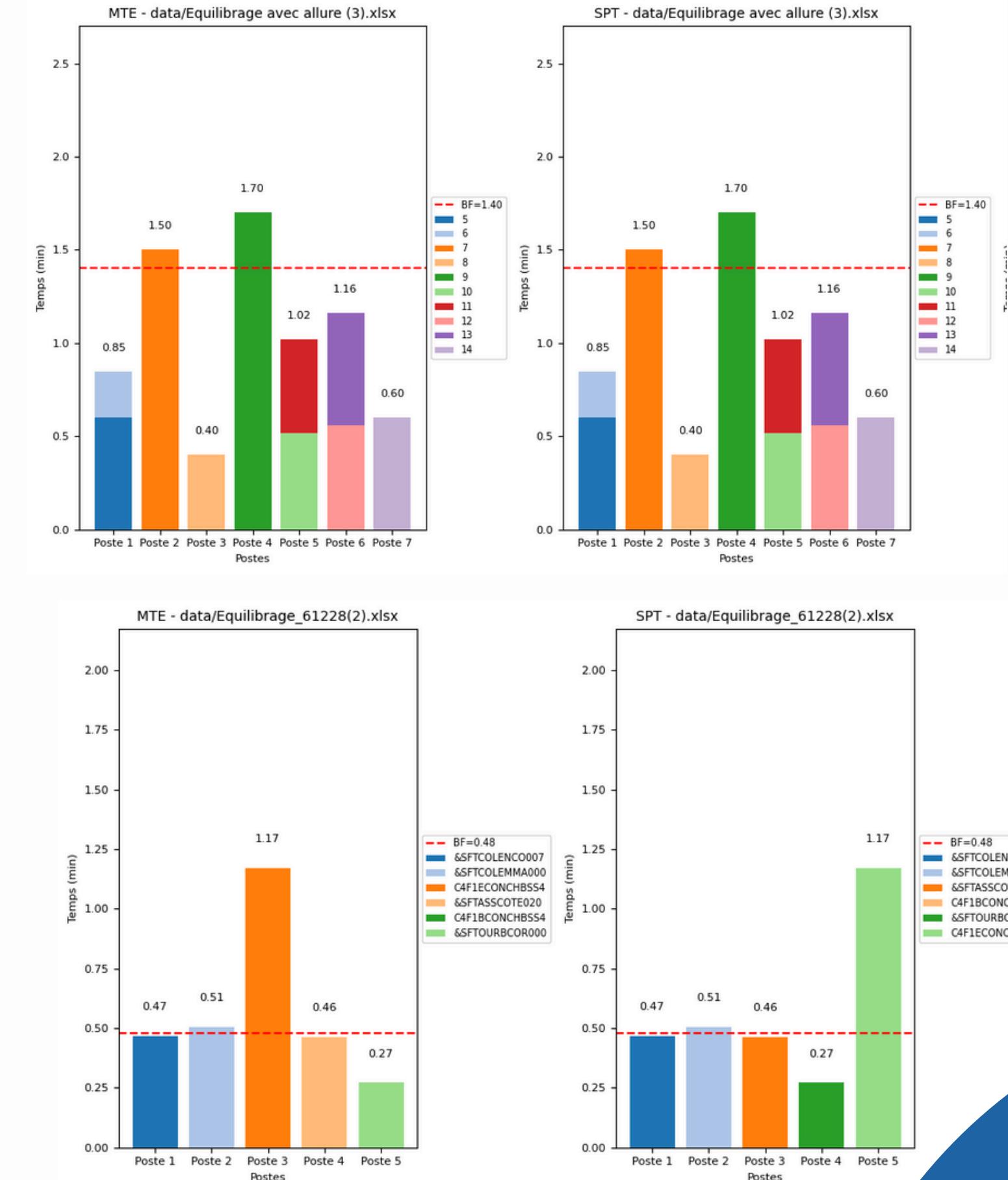
# Analyses d'équilibrage

MTE offre un compromis plus stable entre efficacité et fluidité. Les méthodes heuristiques surchargent certains postes au détriment de l'équilibre global.

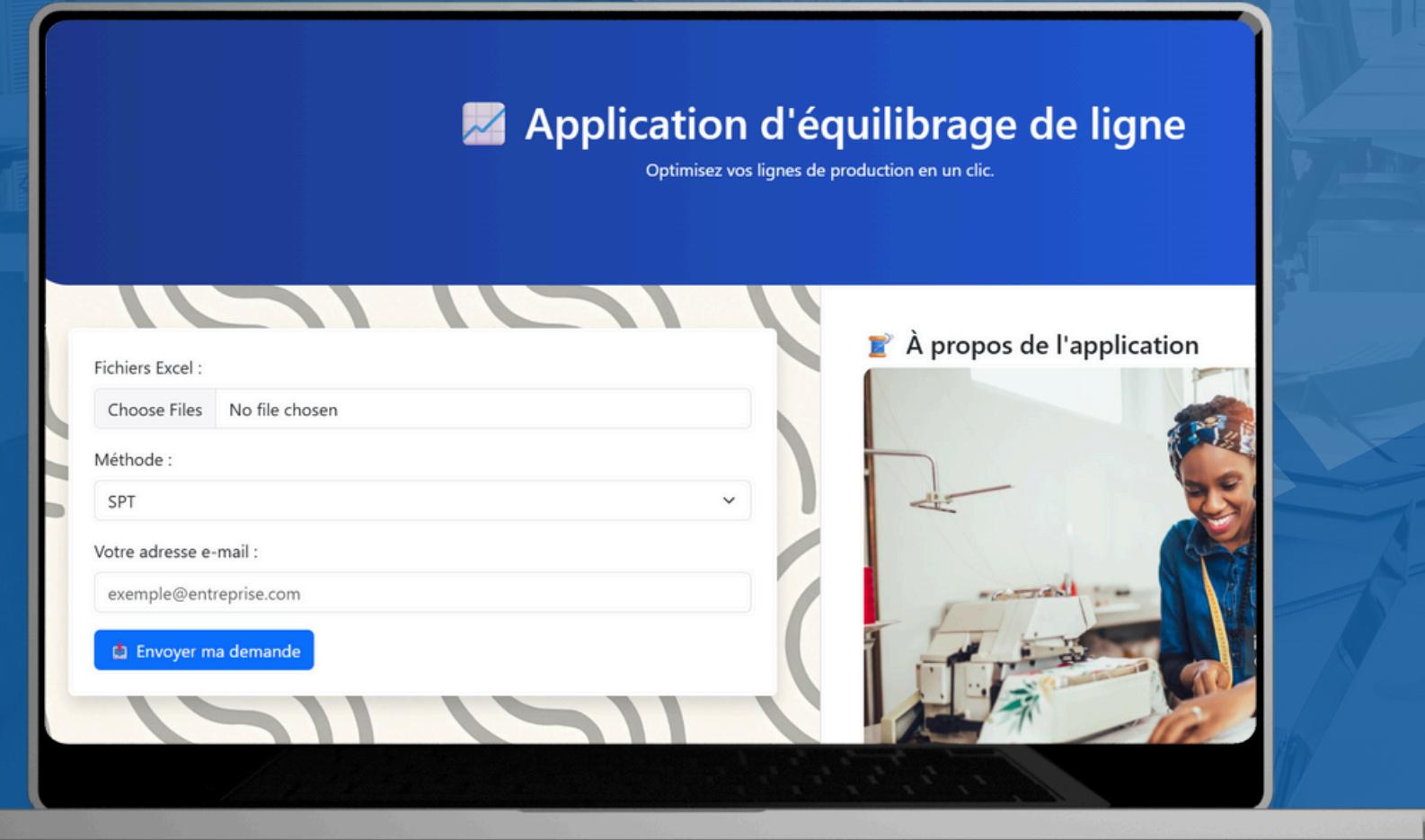
Même constat. Le modèle MTE semble fragmenter intelligemment les tâches longues tandis que les heuristiques provoquent un empilement excessif.



malgré l'activation du mécanisme de fragmentation dans le modèle MTE.  
Cette situation s'explique par un réglage de la tolérance  $\epsilon$  jugé insuffisant dans certaines instances.



# Développement de l'application web



## Interface client

Fichiers Excel :

Choose Files No file chosen

Méthode :

SPT

Votre adresse e-mail :

exemple@entreprise.com

Envoyer ma demande

## Requêtes Clients

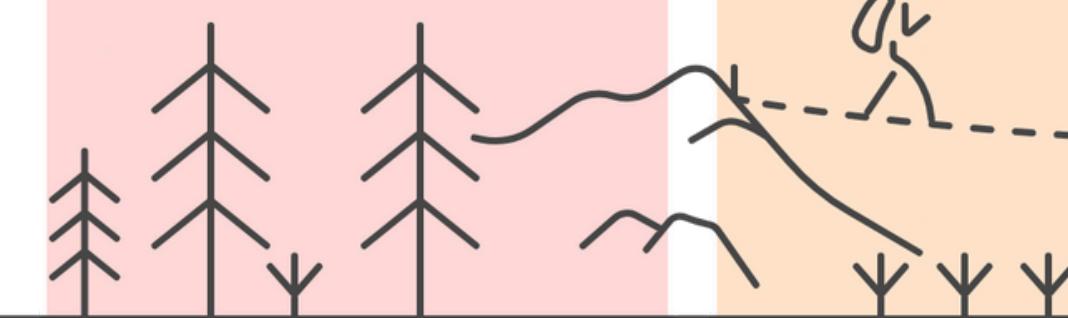
Date	Email Client	Nom du fichier	Méthode	Statut	Actions
2025-06-21 15:41	youssef.khalfa1@gmail.com	Equilibrage_61228.xlsx	MTE	Envoyé	
2025-06-21 15:45	youssef.khalfa@centrale-casablanca.ma	Equilibrage_79615.xlsx	RPW	Envoyé	
2025-06-21 16:02	youssef.khalfa1@gmail.com	Equilibrage60511.xlsx	MTE	Envoyé	
2025-06-21 16:07	youssef.khalfa1@gmail.com	Equilibrage60511.xlsx	MTE	Envoyé	
2025-06-21 16:21	peeka_leeka@outlook.com	Equilibrage_61228.xlsx	SPT	Envoyé	

## Interface Admin

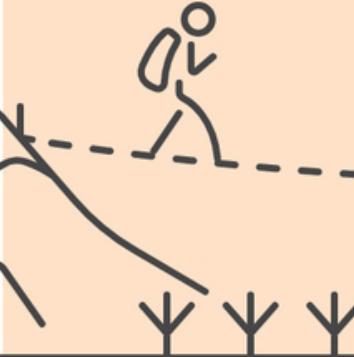
# Formulaire “demande”

# Perspectives & Valorisation

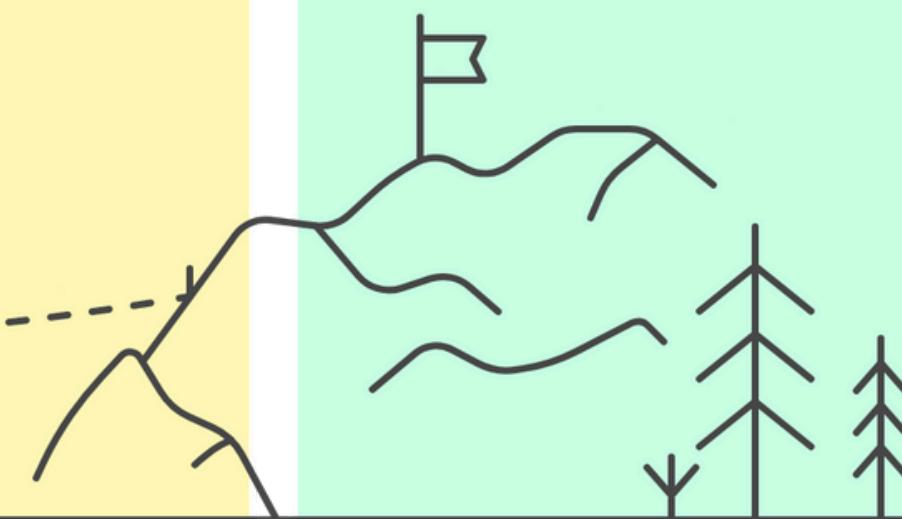
Modèle MTE  
Valeur industrielle et académique limitée



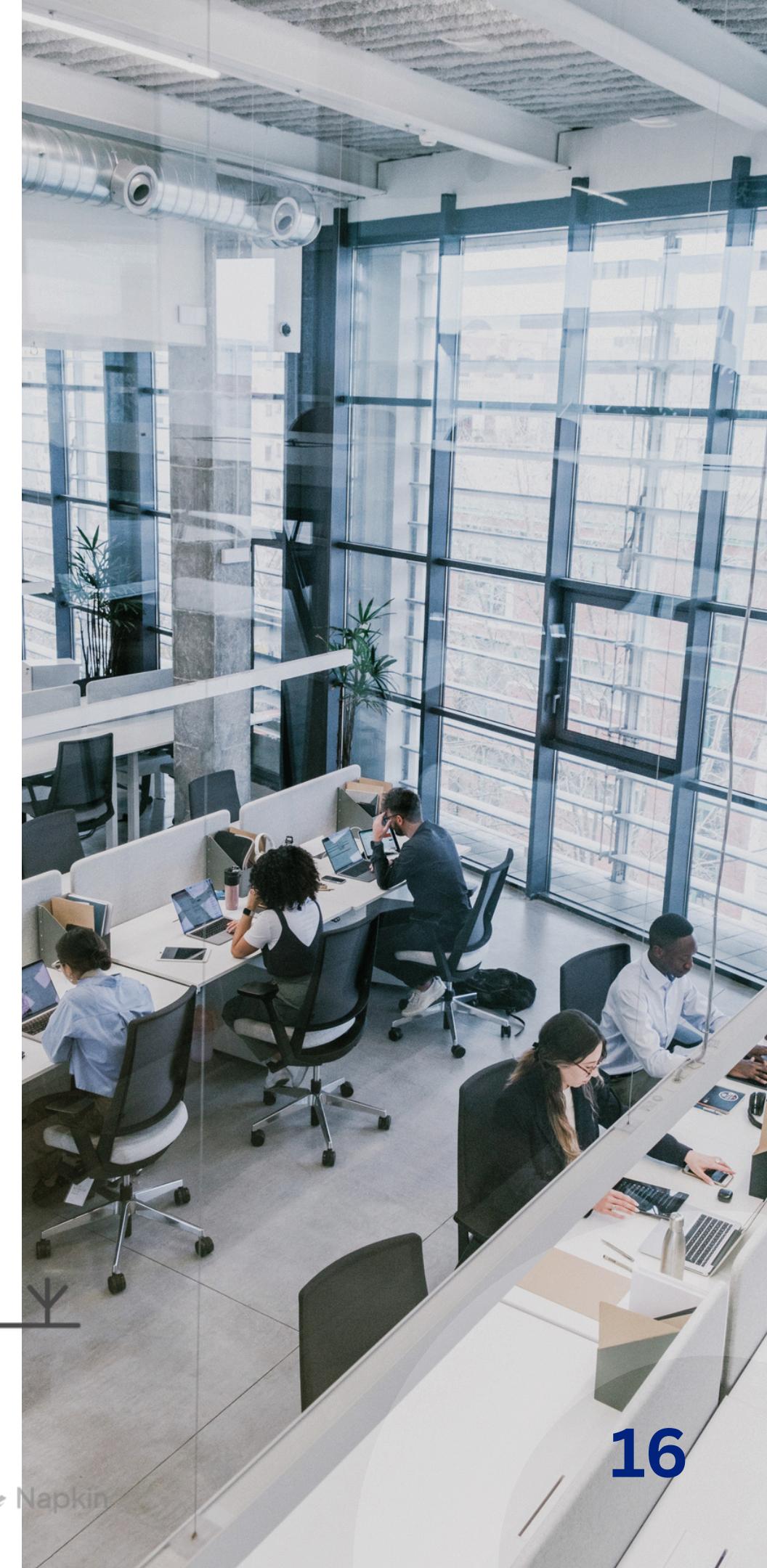
Améliorations techniques  
Optimiser les algorithmes, enrichir l'interface web



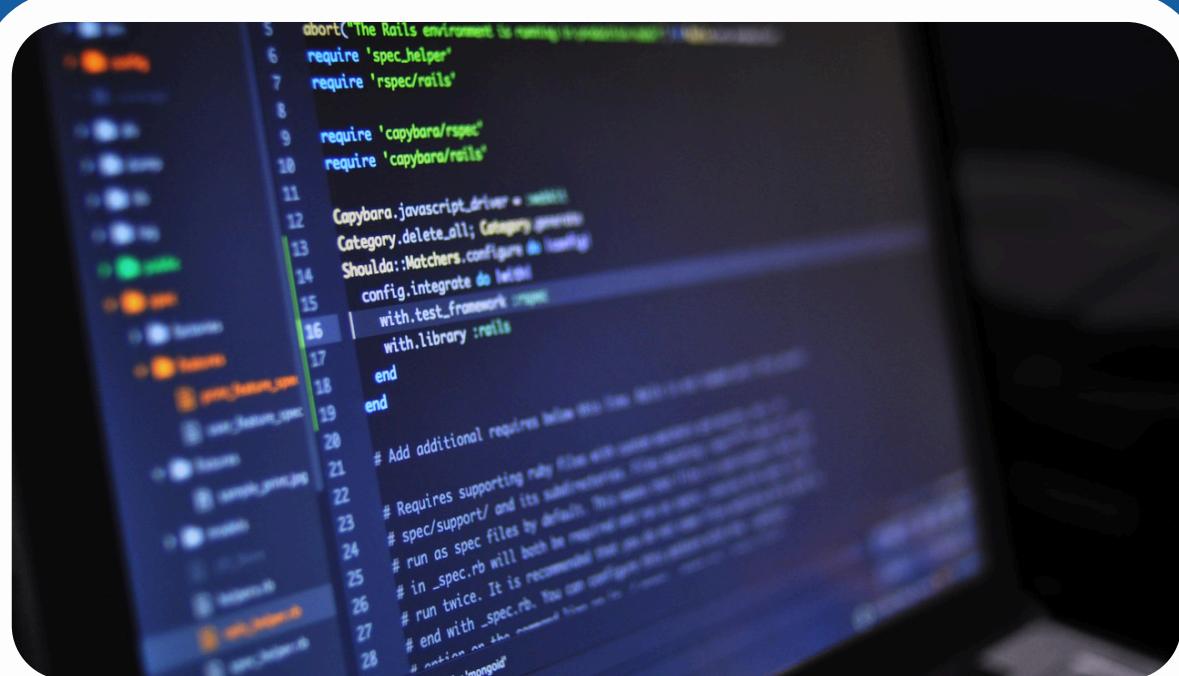
Intégration de l'intelligence artificielle  
Structurer les données, développer un modèle prédictif



Modèle MTE amélioré  
Haute valeur industrielle et académique



# Perspectives & Valorisation



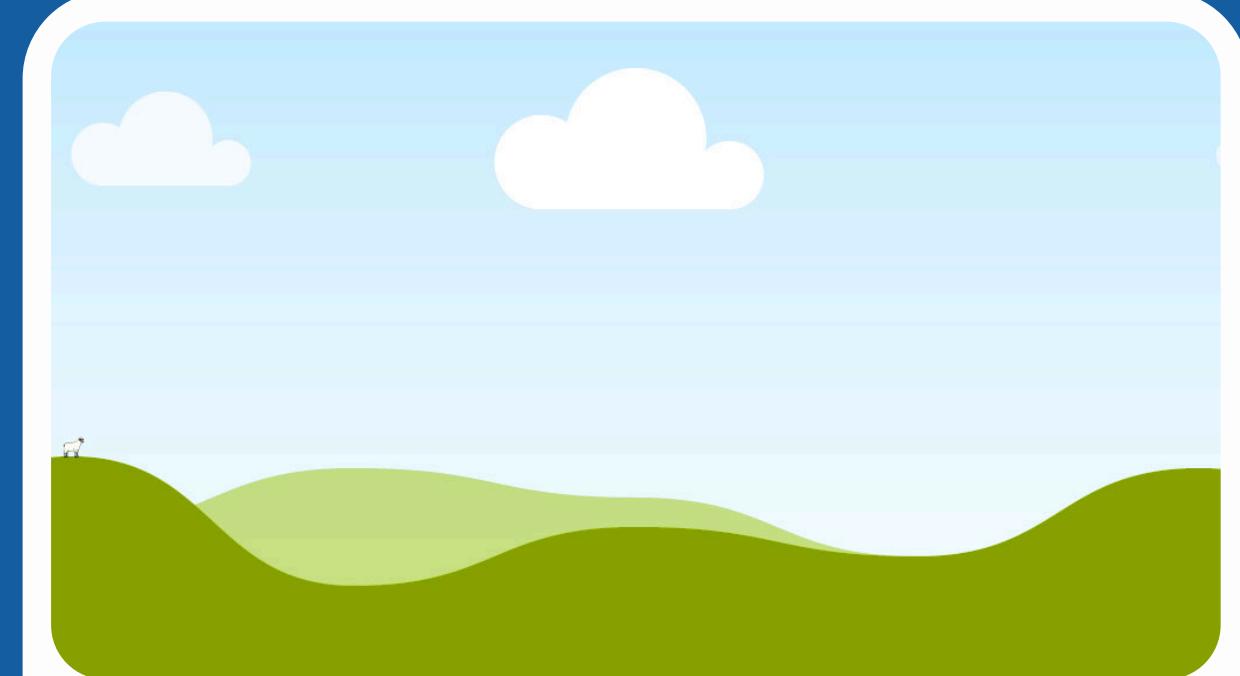
## Software

Outil déployable sous forme de service web à destination des ateliers textiles



## IDEE STARTUP

Possibilité de proposer une version commerciale ou SaaS (Software as a Service)



## Expansion

Applicabilité à d'autres secteurs : automobile, ameublement, électronique

# Conclusion & Remerciements

Ce stage a représenté une immersion riche et concrète dans l'univers de l'optimisation industrielle appliquée au textile.

À travers le développement du modèle MTE, j'ai pu combiner rigueur mathématique, programmation avancée et adaptation aux contraintes métier.

01

Nous avons apporté une alternative robuste aux méthodes classiques (SPT, RPW), en assurant un meilleur équilibre entre réalisme opérationnel et performance.

02

L'outil numérique conçu (Python + Web) constitue une solution complète, automatisée et prête à l'usage, ouvrant la voie à des extensions futures via l'intelligence artificielle.

03

Ce projet a renforcé ma compréhension de la complexité industrielle, tout en développant mes compétences en modélisation, développement logiciel et vision système.

# MERCI POUR VOTRE ATTENTION



**KHALFA Youssef**

Elève centralien en 2A à ECC



+212 06 33 25 36 80



<https://github.com/frostkose/portfolio>



Campus Ecole Centrale  
Casablanca

