

# Analyse et Amélioration de la Performance d'une Chaîne de Production Via Simulation

MOHAMED FRIHAT<sup>1</sup>, KHALED DAOUDI<sup>1</sup>, CHÉRIF SADFI<sup>1</sup>, ATIDEL B.HADJ ALOUANE<sup>1</sup>

<sup>1</sup>ENIT, OASIS

1002 Tunis, Tunisie

[frihatmohamed@hotmail.fr](mailto:frihatmohamed@hotmail.fr), [daoudikhaled@gmail.com](mailto:daoudikhaled@gmail.com), [cherif.sadfi@gmail.com](mailto:cherif.sadfi@gmail.com), [atidel.hadj@enit.rnu.tn](mailto:atidel.hadj@enit.rnu.tn)

---

**Résumé** - Dans une chaîne de production, aussi complexe que celle de la fabrication du cuir, plusieurs perturbations influent sur les performances du système et le rendent très instable et imprédictible. La simulation des flux offre au gestionnaire de production la possibilité d'analyser et de tester différents scénarii afin d'améliorer les performances du système. Dans le présent travail, nous considérons le cas d'une tannerie tunisienne et nous utilisons la simulation à événements discrets afin d'améliorer les performances du système de production. Différentes règles d'ordonnancement et modes de gestion sont employés, ce qui permet de réduire le temps de séjour et le retard de livraison et augmenter la productivité du système de production.

**Abstract** - In a complex production chain such as the leather manufacturing system, several disturbance events may affect the system performances and make it very unstable and unpredictable. Flow simulation provides a production manager with the opportunity to analyze and test new ideas in order to enhance system performances. In the present work, we consider the case of a Tunisian tannery and use discrete event simulation to improve its system performances. Various scheduling rules and management methods are deployed, resulting in flow time and lead time reduction, and in increased system productivity.

**Mots clés** - système de production, modélisation, simulation, performances

**Key words** - production system, modeling, simulation, performances

---

## 1 INTRODUCTION

Les processus de production sont généralement caractérisés par une complexité de leurs opérations techniques et de leurs modes de gestion.

L'approche taylorienne basée sur les micro-séquences opératoires, avait un impact avéré sur l'amélioration de la productivité des systèmes de production. Mais depuis les années 70, cette méthode a prouvé une insuffisance à gérer la grande variabilité des processus et des procédures intégrés, la complexité des opérations techniques et la flexibilité des systèmes de production.

En vue d'améliorer les performances de son système de production, le dirigeant est amené à tester des scénarii sur-le-champ, ce qui demande des coûts et des efforts énormes à consacrer.

Et afin de lui permettre d'évaluer ses stratégies et prendre ses décisions, il lui faut un outil d'aide à la décision bien structuré, émulant le comportement de son processus, et exploitant une base de données pour appliquer un ensemble de modèles et de

procédures apportant les éléments de réponse aux questions posées, au travers les valeurs des indicateurs de performance qu'il désire avoir. C'est dans ce cadre que la simulation impose son existence.

Dans cet article, en considérant le cas d'une tannerie tunisienne, nous détaillons les étapes à suivre pour aboutir à un modèle de simulation valide. De plus, nous testons certaines règles d'ordonnancement et différentes stratégies de gestion afin d'améliorer les performances du système.

## 2 ETAT DE L'ART

Depuis 1973, la simulation a été introduite dans le domaine des services avec la tentative d'automatiser les chemins de fer, puis dans le domaine militaire jusqu'à l'industrie. Cet outil très efficace a permis une facilité impeccable à gérer les systèmes complexes et une flexibilité impressionnante à mener des expériences impossibles à mener en réalité.

Aujourd'hui, face à la concurrence en industrie, les recherches menées par les bureaux R&D en vue d'améliorer les

performances des systèmes industriels sont, dans une grande partie, basées sur la simulation.

En effet, différents facteurs industriels contribuent dans la perturbation du système et exigent une possession d'un outil d'aide à la décision émulant le comportement du système et fournissant au décideur les données nécessaires et suffisantes pour prendre ses décisions. Parmi ses facteurs nous citons :

- ✓ La complexité des processus de production qui exige de l'expérience et de l'expertise technique et organisationnelle, pour gérer les situations compliquées ;
- ✓ Les différents phénomènes aléatoires perturbant le fonctionnement du processus ;
- ✓ Les contraintes face à l'application de certains scénarii (contraintes de coût, de temps et de ressources).

Le potentiel de la simulation est très vaste. En effet, la simulation est applicable aujourd'hui à tous les flux de l'industrie et des services [Berchet, 2000]. Dans la majorité des cas, cet outil est utilisé dans la phase de conception ou d'amélioration des ateliers de production, pour tester des règles d'ordonnancement [Da Silva et al, 2014] ou pour identifier les dysfonctionnements du système et les goulots d'étranglement [Mirdamadi, 2009]. Cet outil peut être couplé à des algorithmes d'optimisation afin de déterminer les valeurs optimales de pilotage ([Hani et al, 2008], [Fontanili, 1999], [Pierreval, 1997]). La simulation peut être aussi utilisée en phase d'exploitation comme un outil de planification et d'ordonnancement [Drake et Smith, 1996].

### 3 CONTEXTE DE L'ETUDE

Le processus de fabrication du cuir est très compliqué, en termes des spécificités techniques et différents modes de gestion des stocks, des achats et de la production.

Il s'agit de transformer les peaux brutes animales en un cuir selon les spécifications des clients. Ces dernières sont très variables et concernent essentiellement le choix du cuir, sa couleur, son toucher, son épaisseur, etc. De plus, plusieurs incertitudes ou aléas existent et différentes perturbations peuvent intervenir. Ces aléas se partagent entre internes et externes (figure 1).

Il est intéressant alors d'établir une maquette de simulation, permettant de prévenir le comportement du système réel vis-à-vis des perturbations introduites. Comme, le système considéré est dynamique et stochastique, la simulation à événements discrets est particulièrement bien adaptée [Stewart, 2003].

### 4 DESCRIPTION DU PROCESSUS

Dans ce papier, nous considérons le cas d'un fabricant de cuir tunisien qui dispose de deux lignes de production (figure 2) : la Tannerie pour la fabrication du cuir à partir des peaux bovines et la Mégisserie pour la fabrication du cuir à partir des peaux ovines.

La fabrication du cuir dans chaque ligne (Tannerie ou Mégisserie) de production se fait en passant par plusieurs départements (tableau 1).

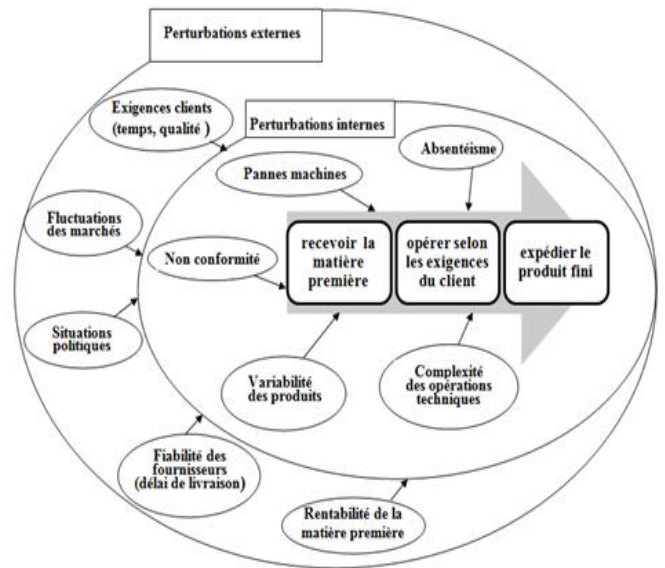


Figure 1. Perturbations influant le système de production

Tableau 1. Activités des différents départements

Département	Activité
Magasin Peaux Brutes	Réception et triage des peaux brutes
Rivière	Transformation de peaux en cuir « Wet Blue »
Classement Wet Blue	Classement des peaux selon le choix
Teinture	Coloration basique des peaux
Corroyage	Séchage et assouplissement des peaux
Finissage	Finition couleur et embellissement de l'aspect de la peau
Magasin produits finis	Contrôle qualité et préparation à l'expédition

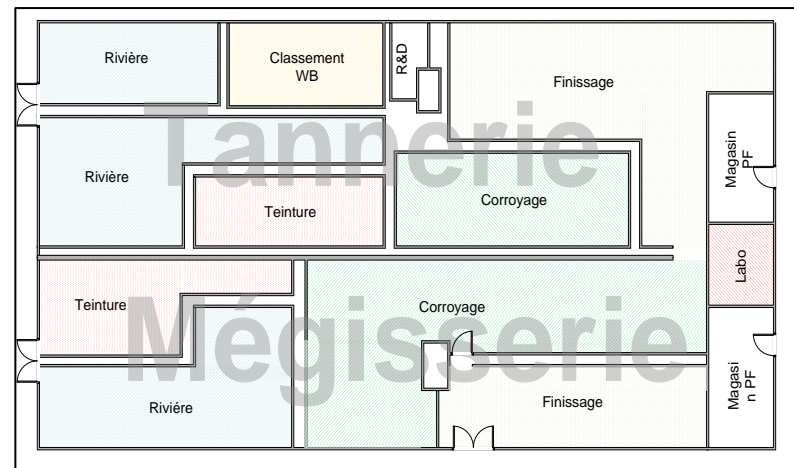


Figure 2. Modèle représentatif de l'usine de production

## 5 METHODOLOGIE D'ELABORATION DU PROJET

Plusieurs contributions ont été proposées dans le but de définir le processus adéquat à suivre dans un projet de simulation et qui expriment des visions assez différentes, parfois complémentaires ([Pritsker, 1986], [Banks, 1994], [Law, 1994], [Revel et al, 2004]).

Une vision plus simple consiste à élaborer un projet de simulation en trois étapes :

- ❖ **Analyse du problème** : cette étape inclut les phases suivantes :
  - ✓ Spécifier le besoin derrière la simulation ;
  - ✓ Fixer les objectifs à atteindre ;
  - ✓ Collecter les données nécessaires au paramétrage du modèle ;
  - ✓ Etablir le modèle conceptuel (cartographie des flux) ;
  - ✓ Valider le modèle conceptuel.
- ❖ **Modélisation** : cette étape consiste à implémenter le modèle conceptuel sur un progiciel de simulation et ensuite valider le modèle avec le système réel.
- ❖ **Expérimentation** : cette étape résume les phases suivantes :
  - ✓ Spécifier les scénarii à tester et préciser les indicateurs de performance à suivre ;
  - ✓ Analyser et interpréter les résultats générés ;
  - ✓ Prendre les décisions.

### 5.1 Collecte et Analyse des données

Le système de production considéré est assez complexe. En effet, certains départements sont du type job shop hybride comme les départements corroyage et finissage avec une grande diversité et variabilité dans les commandes clients et donc dans les articles traités. Pour faciliter l'étude et réduire la complexité du problème, nous utilisons la méthode Pareto permettant de dégager les articles les plus traités et donc les gammes opératoires les plus fréquentes, ce qui permet d'établir la cartographie des flux pour chaque ligne de production (figures 3 et 4).

Les outils utilisés dans la collecte des données sont :

- Des analyses des documents internes de l'entreprise. Cette forme d'investigation est toujours très instructive et permet de prendre une vision d'ensemble sur l'état réel de l'organisation. En outre, cette analyse permet d'explorer des informations qualitatives, d'en extraire des indices ou des synthèses dans un but de détecter des lacunes dans les processus ;
- Des consultations des systèmes GPAO, GMAO et GQAO ;
- Des consultations des enregistrements internes du taux de rendement synthétique TRS ;
- Des réunions quotidiennes et des entretiens ouverts et standardisés avec les responsables de production afin de nous servir des documents utiles et des historiques de la production ;
- Des entrevues avec les contremaîtres pour valider certaines informations spécifiques à leurs départements et avoir des détails sur les processus de production.

Les données collectées concernent essentiellement :

- Le carnet de commandes : familles des articles, caractéristiques (quantité, choix, épaisseur), dates d'arrivée et dates de livraison ;

- Les caractéristiques des entités circulant dans le système (taille des lots traités, les gammes opératoires des articles, taux de non-conformité, processus de retraitement des articles non conformes, etc.) ;
- Les caractéristiques des ressources de production: machines et ouvriers (horaires de travail, nombre, affectations, cadences, pannes machines MTBF, temps de réparation MTTR, taux d'absentéisme, etc.) ;
- L'historique des achats des peaux brutes par fournisseur, ainsi que les résultats de classement et tri par choix.

Pour paramétrer le modèle, il faut déterminer des lois régissant les différentes composantes du modèle. Le module « Input Analyzer » de l'outil Arena permet de fournir la meilleure distribution pour chaque échantillon de données introduit.

La figure 5 présente la distribution déduite pour la quantité de peaux brutes ovines à la réception pour un fournisseur local.

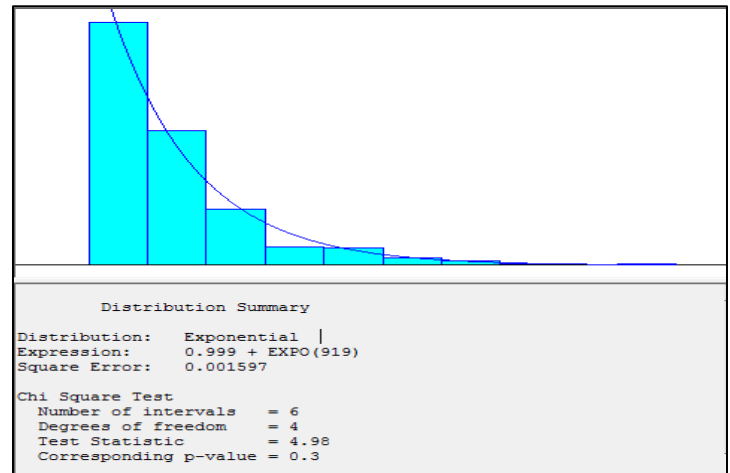


Figure 5. Distribution de la quantité de peaux ovines reçues

### 5.2 Implémentation et Validation du modèle

Une fois les données nécessaires sont collectées et les modèles conceptuels (cartographies des flux) sont validés, nous passons à l'implémentation du système de production, en utilisant l'outil de simulation Arena 14.0.

Après cette phase de modélisation informatique, nous testons le modèle pour le valider. Dans ce qui suit, nous détaillons les techniques et étapes de validations utilisées.

#### 5.2.1 Vérification du modèle

Cette étape consiste à s'assurer que tous les composants du système sont implémentés dans le modèle. Pour se faire, nous suivons l'approche "Diviser et régner" ou connue sous le nom "Divide and Conquer Approach". Cette méthode consiste à suivre le modèle au fur et à mesure de sa construction pour faciliter la localisation des problèmes et leurs corrections.

#### 5.2.2 Validation du modèle

Le modèle doit simuler le comportement du système avec un certain degré de confiance. Cette étape s'étale sur deux phases principales :

▪ **Phase I : Déterminer le nombre de répétitions**

Les résultats que fournit le modèle doivent être stables, mais comme les lois utilisées sont de nature probabiliste, nous ne pouvons pas nous contenter d'une seule répétition. Le modèle doit être représentatif des différentes valeurs possibles générées par les différentes lois introduites. Dans ce cadre, nous cherchons à déterminer le nombre de répétitions nécessaire pour la précision des résultats. L'algorithme adopté est détaillé dans le tableau 2. Une fois ce formulaire est appliqué, nous nous assurons que notre modèle fournira des valeurs des indicateurs de performance robustes que nous pouvons admettre dans nos interprétations.

L'indicateur de performance adopté pour déterminer le nombre de répétitions, pour chaque ligne de production, est la quantité de peaux produites pendant 90 jours.

**Tableau 2. Algorithme de calcul du nombre de répétitions**

<i>Etape</i>	<i>Description</i>
1. Construire un échantillon.	Exécuter 5 à 10 répétitions et collecter les résultats pour le nombre de peaux produites.
2. Calculer la Moyenne $\bar{X}$ , l'Ecart type $\delta(n)$ et l'Erreur standard. $\epsilon(n)$	<p>La moyenne de l'échantillon <math>\bar{X}</math> :</p> $\bar{X} = \sum_{i=1}^n \frac{X_i}{n} \text{ en } (Px)$ <p>L'écart type <math>\delta</math> :</p> $\delta(n) = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (X_i - \bar{X}(n))^2}{n-1}} \text{ en } (Px)$ <p>L'erreur standard <math>\epsilon</math> :</p> $\epsilon(n) = t_{n-1, 1-\frac{\alpha}{2}} * \frac{\delta(n)}{\sqrt{n}} \text{ en } (Px)$ <p>D'où l'intervalle de confiance</p> $\boxed{\bar{X} \pm \epsilon} \text{ en } (Px)$
3. Choisir le niveau de précision et recalculer l'erreur standard $\epsilon$	Le niveau de précision est 5 % $\boxed{\epsilon = 0.05 * \bar{X}} \text{ en } (Px)$
4. Calculer le nombre de répétitions n	$n = t_{n-1, 1-\frac{\alpha}{2}}^2 * \left(\frac{\delta}{\epsilon}\right)^2$

Les valeurs trouvées sont 42 répétitions pour la Tannerie et 17 répétitions pour la Mégisserie. Pour le modèle entier, nous considérons alors le maximum entre ces deux valeurs (42 répétitions).

▪ **Phase II : Effectuer le test de Mann-Whitney U**

Ce test est utilisé souvent pour comparer deux échantillons indépendants de petite taille et prouver qu'ils viennent de la

même population ou de populations différentes. Il s'agit d'estimer si les variables de deux échantillons suivent la même loi de probabilité. Comme chaque département dispose de ses propres règles de gestion des flux et de stocks, la validation du modèle entier ne permet pas de bien détecter les problèmes. Pour cette raison, nous procédons à une validation plus fine par département.

Dans notre cas, l'indicateur choisi pour la validation du modèle est le temps de séjour moyen mensuel. La taille de l'échantillon considéré est égale à 12 mois.

Les différentes étapes suivies sont illustrées dans le tableau 3.

**Tableau 3. Etapes du Test de Mann-Whitney U**

<i>Etape</i>	<i>Description</i>
1. Trier les valeurs des échantillons.	Préparer les échantillons, de tailles n1 et n2, à comparer et affecter à chacune des valeurs son rang, indépendamment de l'échantillon dont elle appartienne, dans un ordre croissant.
2. Calculer les sommes des rangs de chaque échantillon S1 et S2	$S = \sum_{i=1}^n X_i$
3. Calculer U de Mann-Whitney	$U = \min(U_1, U_2)$ <p>Où</p> $U_i = S_i - \frac{n_i(n_i+1)}{2}$
4. Calculer Z	$Z = \frac{U - \mu}{\sigma}$ <p>Où</p> $\mu = \frac{n_1 n_2}{2}$ $\sigma = \sqrt{\frac{n_1 * n_2 (n_1 + n_2 + 1)}{12}}$
5. Déduction : Comparer Z à celle $Z_{critique}$	Tester l'hypothèse nulle qui admet que les échantillons appartiennent à la même population. Si $Z \in [-Z_{critique}; +Z_{critique}]$ alors l'hypothèse est vraie et le modèle est valide.

En appliquant le test de Mann-Whitney U, sur l'échantillon fourni par notre modèle et l'échantillon du système réel, nous validons notre modèle.

5.3 Expérimentations

A la suite du développement et de la validation du modèle permettant de simuler le comportement réel du système de production, nous testons plusieurs règles d'ordonnancement, certaines stratégies de gestion et quelques pistes

d'amélioration, et nous évaluons leurs impacts sur les performances du système.

Les indicateurs de performance choisis sont :

- Le temps de séjour moyen total dans chaque ligne ;
- Le temps de séjour moyen local dans chaque département ;
- Le temps d'attente moyen du stock Wet Blue dans chaque ligne ;
- Le retard de livraison moyen dans chaque ligne ;
- Le taux de commandes produites (le pourcentage des commandes produites par rapport au total des commandes reçues) dans chaque ligne.

### 5.3.1 Règles d'ordonnancement

Il s'agit, dans un premier temps, pour chaque département, de déterminer la séquence des commandes la plus performante.

La règle actuelle admise dans les deux lignes de production est la règle FIFO " First In first Out.

En évaluant cette règle avec le modèle de simulation, nous déduisons les performances présentées dans le tableau 4.

**Tableau 4. Résultats de la règle FIFO**

Indicateur		Résultat
Temps de séjour Total ( <i>j</i> )	Tannerie	31.71±1.81
	Mégisserie	19.85±1.2
Temps de séjour Rivière ( <i>j</i> )	Tannerie	8.41±0.69
	Mégisserie	7.19±0.06
Temps de séjour Teinture Corroyage ( <i>j</i> )	Tannerie	8.38±0.27
	Mégisserie	8.62±0.53
Temps de séjour Finissage Magasin PF ( <i>j</i> )	Tannerie	6.59±0.28
	Mégisserie	5.06±0.21
Temps de stockage Wet Blue ( <i>j</i> )	Tannerie	73.3±1.69
	Mégisserie	59.16±1.26
Taux de commandes produites (%)	Tannerie	18.04±1.13
	Mégisserie	51.93±1.87
Retard de livraison ( <i>j</i> )	Tannerie	13.09±0.99
	Mégisserie	2.72±1.08

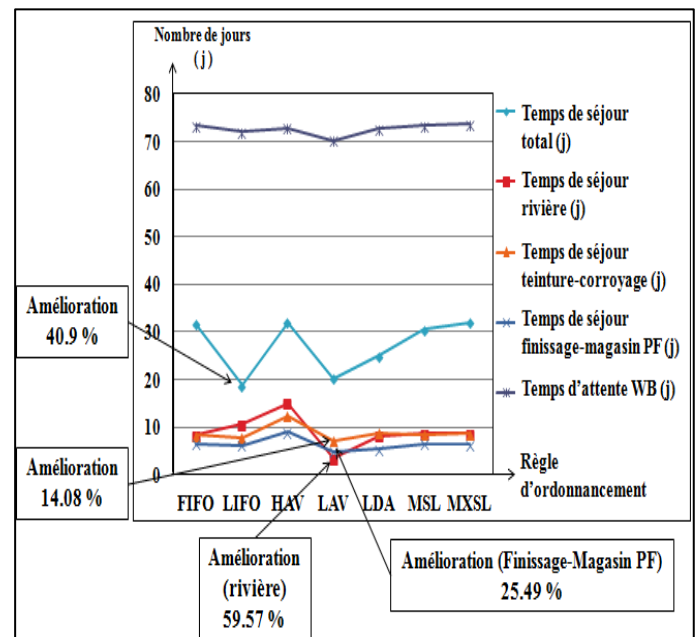
Les objectifs visés en testant les différentes règles d'ordonnancement sont :

- ✓ Une minimisation du temps de séjour moyen ;
- ✓ Une minimisation du retard de livraison ;
- ✓ Une maximisation du taux de commandes produites.

Les différentes règles à tester sont :

- **LIFO** (Last In First Out) : consiste à prioriser la commande arrivant la dernière ;
- **HAV** (Highest Attributed Value) : consiste à prioriser la commandes dont la taille est la plus grande ;
- **LAV** (Lowest Attributed Value) : consiste à prioriser la commande dont la taille est la plus petite ;
- **LDA** (Lowest Delay Attributed) : consiste à prioriser la commande dont le délai de livraison est le plus court ;
- **MSL** (Minimum Sequence Length) : consiste à prioriser la commande dont la gamme opératoire est la plus courte ;
- **MXSL** (Maximum Sequence Length) : consiste à prioriser la commande dont la gamme opératoire est la plus longue.

Les résultats de différentes règles d'ordonnancement pour chaque ligne de production sont présentés dans les figures 6 et 7. Nous précisons que l'horizon considéré dans nos simulations est égal à 120 jours et chaque fois que nous changeons la règle d'ordonnancement pour un département, nous gardons la règle FIFO pour les autres.



**Figure 6. Résultats des règles d'ordonnancement pour la Tannerie**

Pour la ligne Tannerie, nous constatons que la meilleure règle d'ordonnancement est la règle LAV. En effet cette règle entraîne les améliorations suivantes :

- Réduction du temps de séjour moyen total de 35.82% ;
- Réduction du temps de séjour moyen dans le département rivière de 59.57% ;
- Réduction du temps de séjour moyen dans le département Teinture-corroyage de 14.08% ;
- Réduction du temps de séjour moyen dans le département Finissage-Magasin PF de 25.49% ;
- Augmentation du taux de commandes produites de 52% ;
- Réduction du retard de livraison moyen de 84.18%.

Nous notons aussi que la règle LIFO permet une amélioration du temps de séjour total moyen de 40.9 %.



**Tableau 7. Résultats de combinaison des règles d'ordonnement pour la Mégisserie**

Département	Résultat attendu	Résultat obtenu
Temps de séjour Rivière (j)	7.19 ±0.06	7.23 ±0.08
Temps de stockage WB (j)	58.55 ±1.08	58.81 ± 1.11
Temps de séjour Teinture Corroyage (j)	8.62 ±0.53	8.88 ±0.52
Temps de séjour Finissage-Magasin PF (j)	4.27 ±0.26	5.11 ±0.19
Temps de séjour moyen (j)	19.85 ±1.2	19.80 ±1.11
Taux de commandes produites (%)	54.37±2.01	52.59±1.52
Retard de livraison (j)	0.02 ±1.47	3.25 ±1.18

Pour la Mégisserie, la plupart des résultats obtenus sont proches des résultats attendus. Sachant que ces derniers sont aussi proches des résultats de la règle FIFO, nous pouvons conclure que les règles d'ordonnement testés ne permettent pas une amélioration significative pour la Mégisserie avec l'état considéré du système. Il est intéressant d'investir dans d'autres stratégies de gestion et quelques pistes d'amélioration.

Dans la suite, nous considérons, dans nos expérimentations, cette combinaison des règles d'ordonnement pour chaque ligne de production.

### 5.3.2 Règles de gestion et pistes d'amélioration

Nous évaluons des nouvelles règles de gestion basées sur le partage des ressources entre les différents départements :

#### ▪ Règle 1 : Partage partiel des ressources humaines

Le principe de cette règle repose sur la polyvalence et la flexibilité de la main d'œuvre. Elle consiste à partager les ressources humaines et favoriser leur transfert entre les différents départements au sein de la même ligne de production, afin d'augmenter la capacité de production et améliorer alors les performances du système (surtout dans le cas suivants : panne machine, rupture de stock, département sous-chargé, etc.).

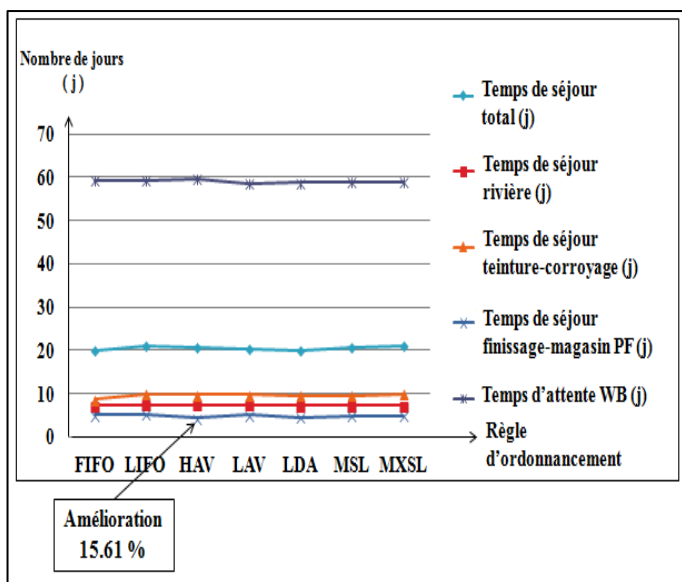
#### ▪ Règle 2 : Partage total des ressources humaines

Il s'agit du même principe que précédemment mais avec un partage des ressources entre les deux lignes de production.

#### ▪ Règle 3 : Partage des ressources machines

Dans la plupart des cas, les commandes sont retardées, car les machines sont trop chargées. En outre, dans certaines périodes, les machines de la Tannerie se trouvent dans un état de surcharge, alors que celles de la Mégisserie sont en sous-charge ou vice-versa. De plus, la Tannerie et la Mégisserie disposent de certaines machines identiques dans différents départements qui peuvent être partagées. Nous précisons que nous avons bien vérifié la faisabilité technique de cette solution.

Nous testons aussi l'apport et le gain de certaines pistes d'amélioration basée sur l'amélioration continue afin de réduire les pertes de performances et les différentes perturbations.



**Figure 7. Résultats des règles d'ordonnement pour la Mégisserie**

Pour la ligne Mégisserie, nous constatons une amélioration pour le département Finissage-Magasin PF avec une réduction du temps de séjour moyen de 15.61% en appliquant la règle HAV et aussi une légère amélioration du temps de stockage moyen du support WB avec la règle LAV.

Dans un deuxième temps, nous choisissons pour chaque département la règle d'ordonnement la plus adéquate (tableau 5), et nous testons pour chaque ligne de production la combinaison déduite. Avec cette dernière, nous cherchons à atteindre les valeurs des indicateurs de performances trouvées précédemment pour chaque règle appliquée séparément.

**Tableau 5. Affectation des règles d'ordonnement**

Département	Tannerie	Mégisserie
Rivière	LAV	FIFO
Classement WB	LAV	LAV
Teinture-Corroyage	LAV	FIFO
Finissage-Magasin PF	LAV	HAV

En combinant ces règles d'ordonnement, nous pouvons rapprocher les meilleures valeurs obtenues et améliorer alors les résultats de la règle FIFO pour la plupart des indicateurs considérés, pour la Tannerie (tableau 6).

**Tableau 6. Résultats de combinaison des règles d'ordonnement pour la Tannerie**

Département	Résultat attendu	Résultat obtenu
Temps de séjour Rivière (j)	3.4 ±0.14	7.38 ±0.56
Temps de stockage WB (j)	70.27 ±1.74	73.98 ±1.6
Temps de séjour Teinture Corroyage (j)	7.2 ±0.23	6.39 ±0.21
Temps de séjour Finissage-Magasin PF (j)	4.91 ±0.19	4.48 ±0.18
Temps de séjour moyen (j)	18.74 ±0.69	19.99 ±0.83
Taux de commandes produites (%)	27.42 ±2.15	24.64 ±1.12
Retard de livraison (j)	0.37 ±0.78	1.83 ±0.51

- La réduction du taux de non-conformité ;
- La réduction des pertes de performances.

▪ **Règle 4 : Amélioration de la qualité des articles**

La non-conformité cause essentiellement une charge horaire supplémentaire pour le département corroyage et finissage ainsi qu'un retard de livraison. Plusieurs projets étudiés, basés sur l'amélioration continue, permet de réduire le taux de non-conformité pour chaque ligne de production à 5% tolérable. Nous évaluons alors cet investissement.

▪ **Règle 5 : Amélioration des performances du service maintenance**

Certains projets étudiés au niveau de la fonction maintenance permettent d'améliorer le MTTR (Mean Time To Repair) de certaines machines. Il s'agit de tester cet investissement en introduisant les valeurs MTTR visées.

▪ **Règle 6 : Réduction des pertes de performance**

Les temps opératoires introduits précédemment dans notre modèle intègrent les pertes de performances réelles. Des nouvelles valeurs sont déterminées, en réduisant ces pertes. Nous désirons savoir si ces temps opératoires améliorent les performances du système.

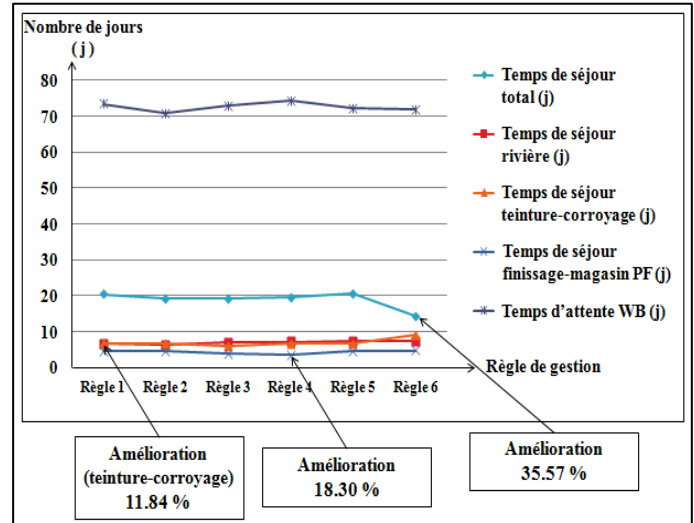


Figure 8. Résultats des règles de gestion pour la Tannerie

Les différentes simulations effectuées montrent les résultats suivants (Figures 8 et 9) :

- ✓ **Règle 1** : Aucune amélioration introduite ;
- ✓ **Règle 2** : Cette règle introduit une amélioration du temps de stockage dans le département classement WB de la Tannerie avec une réduction de 4.3% ;
- ✓ **Règle 3** : Ce mode de gestion entraîne les améliorations suivantes : Le temps de séjour dans les départements teinture-corroyage et finissage-magasin PF de la Tannerie a diminué respectivement de 11.84% et de 19.71%. Le temps de séjour dans le département finissage-magasin PF de la Mégisserie a diminué de 15.98% ;
- ✓ **Règle 4** : L'amélioration dans la fonction qualité apporte des améliorations essentiellement aux départements finissage-magasin PF dans les deux chaînes. : Le temps de séjour dans le département finissage-Magasin PF de la Tannerie a été réduit de 18.30% et le temps de séjour dans le département finissage-magasin PF de la Mégisserie a été réduit de 23.7% ;
- ✓ **Règle 5** : L'investissement dans la fonction maintenance ne conduit pas à une amélioration constatée ;
- ✓ **Règle 6** : La réduction des pertes de performances introduit les résultats suivants : Pour la ligne Tannerie, le temps de séjour moyen a subi une réduction importante de 35.57%, ce qui a permis un avantage d'expédition de 4 jours avant les dates de livraisons fixées et une augmentation du taux des commandes produites de 17.08%. De plus, pour la Mégisserie, le temps de séjour total moyen a diminué de 17.31% avec une réduction importante pour le département finissage-magasin PF de 51.11 %, ce qui a permis un avantage d'expédition de 2 jours avant les dates de livraisons fixées.

Pour conclure, les règles qui ont prouvé leurs avantages sont :

- Le partage total des ressources humaines ;
- Le partage des ressources machines ;

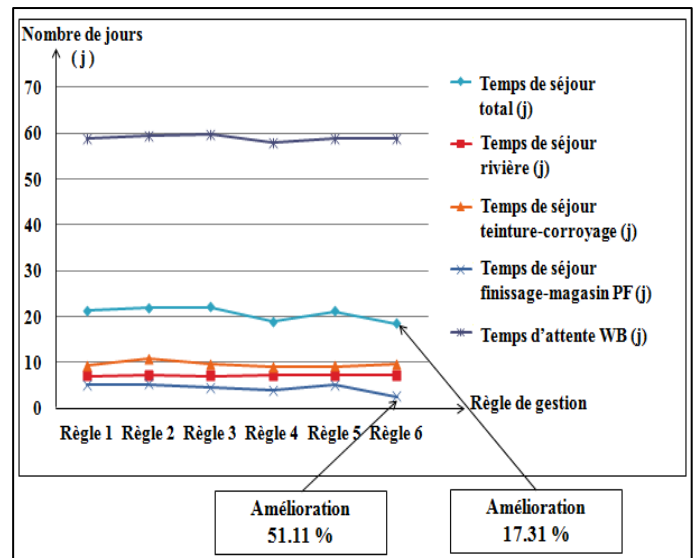


Figure 9. Résultats des règles de gestion pour la Mégisserie

Comme pour les règles d'ordonnancement, nous testons la combinaison de ces règles de gestion et ces pistes d'amélioration, en vue d'atteindre les meilleures valeurs trouvées pour chaque règle appliquée séparément.

D'après les résultats (tableaux 8 et 9), la combinaison de ces règles permet de bien rapprocher les valeurs espérées des indicateurs de performance.

En combinant plusieurs règles d'ordonnancement et de gestion nous avons pu introduire des améliorations majeures sur les deux lignes de production :

**Pour le temps de séjour moyen**

- Tannerie : une réduction de 60.45% ;
- Mégisserie : une réduction de 14.30 %.

### Pour le taux de commandes produites

- Tannerie : une augmentation de 84.64% ;
- Mégisserie : une augmentation de 2.44%.

### Pour le retard de livraison

- Tannerie : une expédition en avance de 6 jours ;
- Mégisserie : une expédition en avance de 2 jours.

**Tableau 8. Résultats de combinaison des règles de gestion pour la Tannerie**

Département	Résultat attendu	Résultat obtenu
Temps de séjour Rivière ( j )	6.4±0.43	5.66±0.41
Temps de stockage Classement WB (j)	71.79±2.04	69.81±1.42
Temps de séjour Teinture-Corroyage (j)	6.03±0.21	7.98±0.23
Temps de séjour Finissage-Magasin PF (j)	3.66±0.16	3.93±0.13
Temps de séjour moyen (j)	14.4±0.45	12.54±0.27
Taux de commandes produites (%)	29.68±1.68	33.31±1.4
Retard de livraison (j)	- 4±0.39	- 6±0.22

**Tableau 9. Résultats de combinaison des règles de gestion pour la Mégisserie**

Département	Résultat attendu	Résultat obtenu
Temps de séjour Rivière ( j )	7.1±0.07	7.24±0.04
Temps de stockage Classement WB (j)	57.97±1.15	58.28±1.22
Temps de séjour Teinture-Corroyage (j)	9.07±0.56	10.10±0.93
Temps de séjour Finissage-Magasin PF (j)	2.63±0.21	2.33±0.2
Taux de commandes produites (%)	54.08±1.71	53.2±2
Temps de séjour moyen (j)	18.48±1.53	17.01±1.36
Retard de livraison (j)	- 2±1.02	- 2±0.9

## 6 CONCLUSION

Cet article présente une approche d'analyse et d'amélioration des lignes de production basée sur la simulation de flux, en considérant le cas d'un fabricant de cuir.

Notre travail consiste à développer une maquette de simulation prenant en compte les spécificités de la production et permettant au gestionnaire de tester différents scénarii d'ordonnancement et de gestion, afin de garantir les meilleures performances du système de production. Les scénarii testés en vue de clarifier le comportement du modèle et prouver les avantages de la simulation, conduisent à des améliorations notables des performances du système de production.

Nous proposons dans nos futurs travaux, de coupler la simulation et l'optimisation, afin de déterminer les quantités d'achat des peaux brutes optimales, le nombre d'employés optimal et d'autres règles de priorité plus performantes.

## 7 REMERCIEMENTS

Les auteurs souhaitent remercier les enseignants M Zied Jemai et Mme Amel Jaoua pour leurs conseils et leurs remarques assez pertinents et l'Agence Nationale de Promotion de la Recherche Scientifique pour le suivi et le financement du projet dans le cadre du dispositif PASRI/MOBIDOC.

## 8 REFERENCES

- Banks, J., (1994) Pitfalls in the simulation process, *Conference on New Directions in Simulation for Manufacturing and Communications*, Operations Research Society of Japan, Tokyo, Japan ,pp,57-63.
- Berchet, C., (2000) Modélisation pour la simulation d'un système d'aide au pilotage industriel", Thèse de doctorat, Institut National, Polytechnique de Grenoble.
- Da Silva, E.B., Goncalves Costa, M., da Silva, M.F., Pereira, F.H., (2014) Simulation study of dispatching rules in stochastic job shop dynamic scheduling, *World Journal of Modelling and Simulation*, vol. 10 No. 3, pp.231-240.
- Drake, G., Smith, J., (1996) Simulation system for real-time planning, scheduling, and control. *Winter Simulation Conference*; Colorado, 1083–1090.
- Fontanili, F., (1999) Intégration d'outils de simulation et d'optimisation pour le pilotage d'une ligne d'assemblage multiproduit à transfert asynchrone “, Thèse de doctorat, Université Paris XIII.
- Hani, Y., Amodeo, L., Yalaoui, F., Chen, H., (2008) Simulation based optimization of a train maintenance facility export. *Journal of Intelligent Manufacturing*, 19(3) :293-300.
- Law, A., (1994) How to successfully simulate your system, *Conference on New Direction in Simulation for Manufacturing and Communications*, Operations Research Society of Japan, Tokyo, Japan, pp.1-3.
- Mirdamadi, S., (2009) Modélisation du processus de pilotage d'un atelier en temps réel à l'aide de la simulation en ligne couplée à l'exécution “, Thèse de doctorat, Université Toulouse.
- Pierreval, H., (1997) Using Evolutionary Algorithms and simulation for the optimization of manufacturing systems. *IIE Transactions*, 29(3) : 181–190.
- Pritsker, A.A.B., (1986) Introduction to simulation and SLAM II, Halsted Press, New York, NY, 3th edition.
- Revel, L., HABCHI, G., Maire, J.L., (2004) Analyse Du Processus D'élaboration D'un Projet de Simulation, *MOSIM'04*, Nantes, France. 1, pp.293-301, 2004.
- Stewart, R., (2003) The Practice of Model Development and Use, Warwick Business School, ISBN 0-470-84772-7.



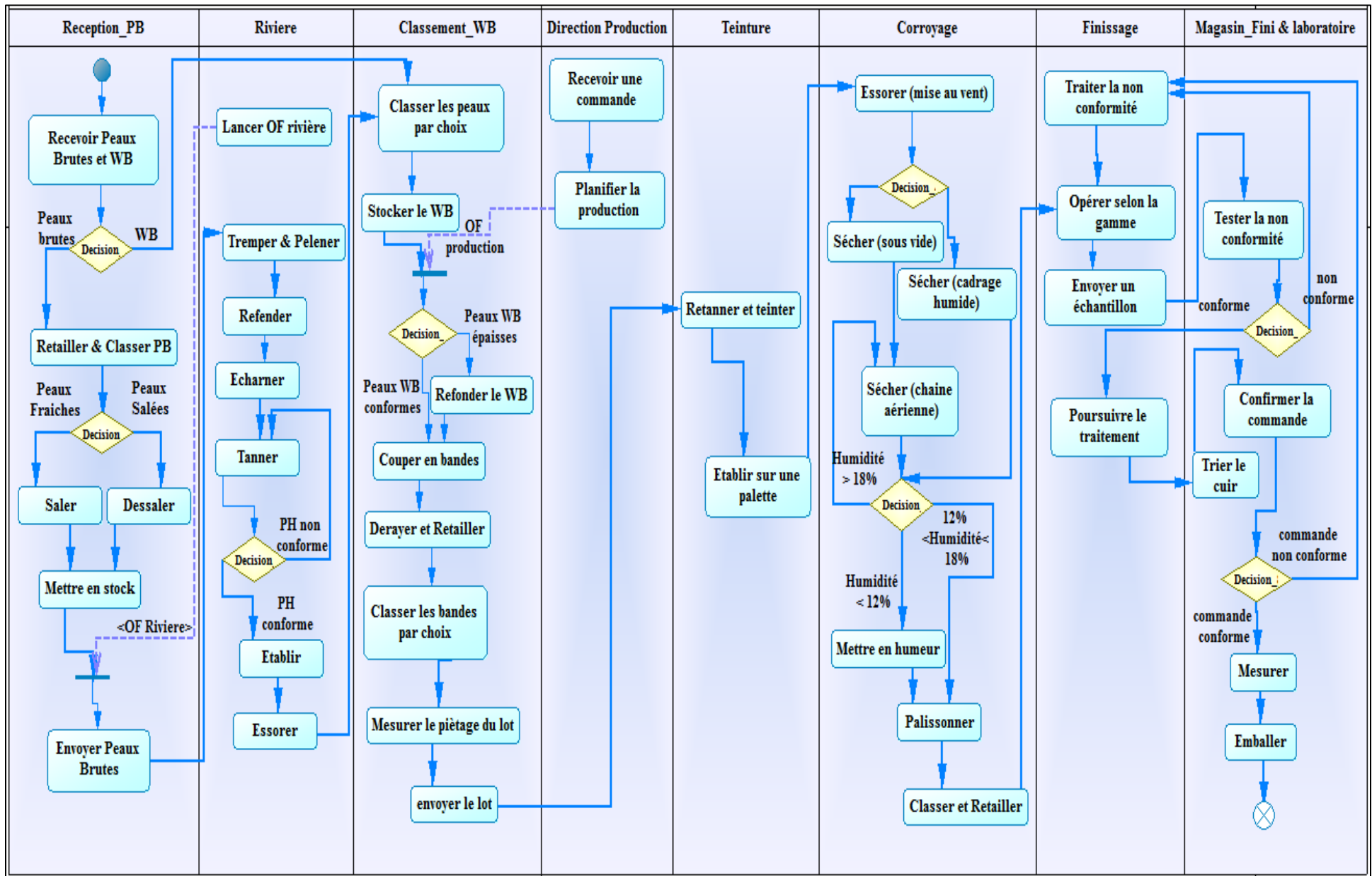


Figure 3. Diagramme d'activités UML de la Tannerie

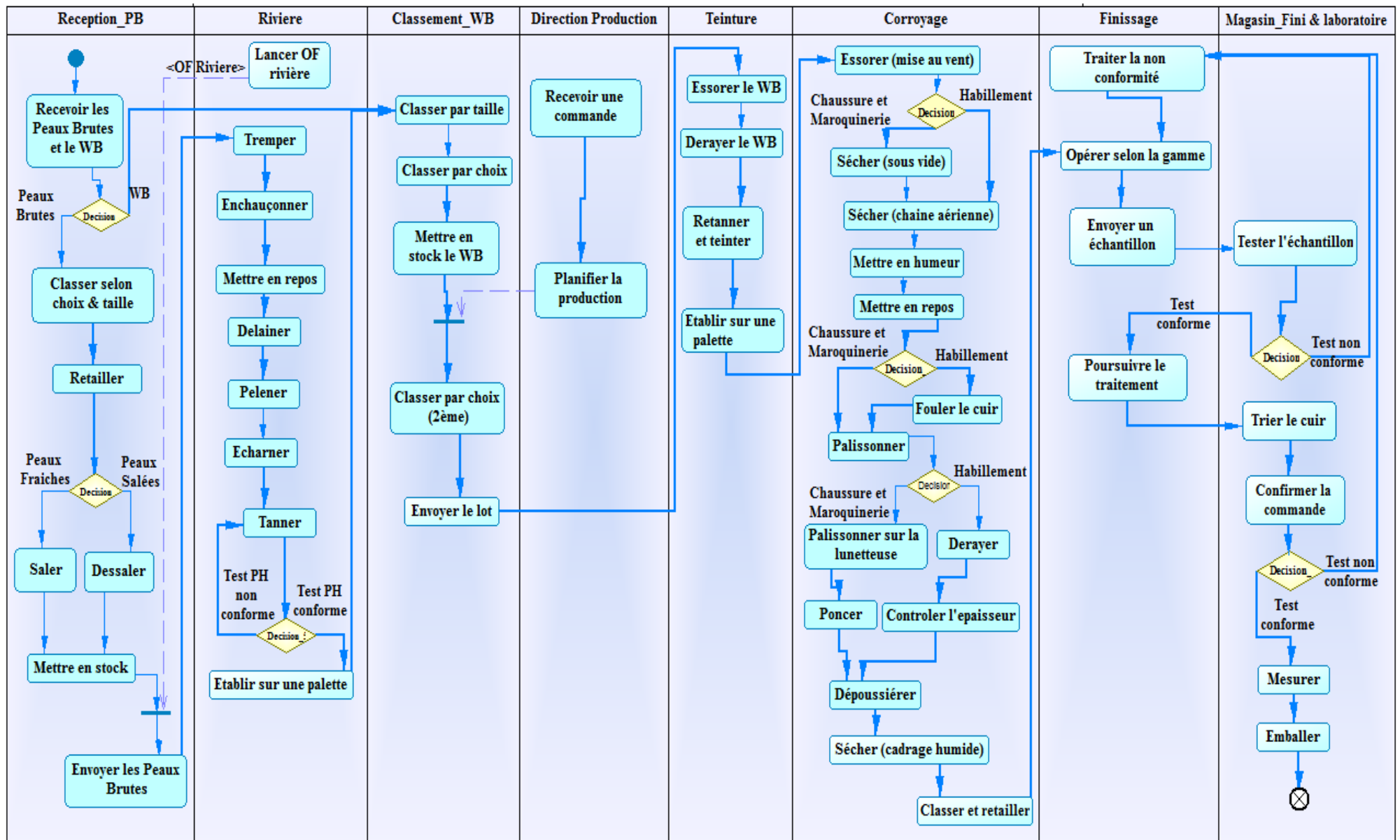


Figure 4. Diagramme d'activités UML de la Mégisserie