



**CONSORTIUM DE RECHERCHE EN INGÉNIERIE
DES SYSTÈMES INDUSTRIELS 4.0**

Anticipation des flux monétaires et de produits pour une gestion optimale des revenus

Nicolas LeBlanc



APN / Schivo

- Compagnie manufacturière basée dans le parc technologique à Québec
- Usinage de pièces métalliques complexes et de haute précision
- Domaine aéronautique, médical et des technologies
- Type de production :
 - Développement constant de nouvelles pièces
 - Petits lots de production
- Niveau d'automatisation élevé mais nécessite tout de même des humains.

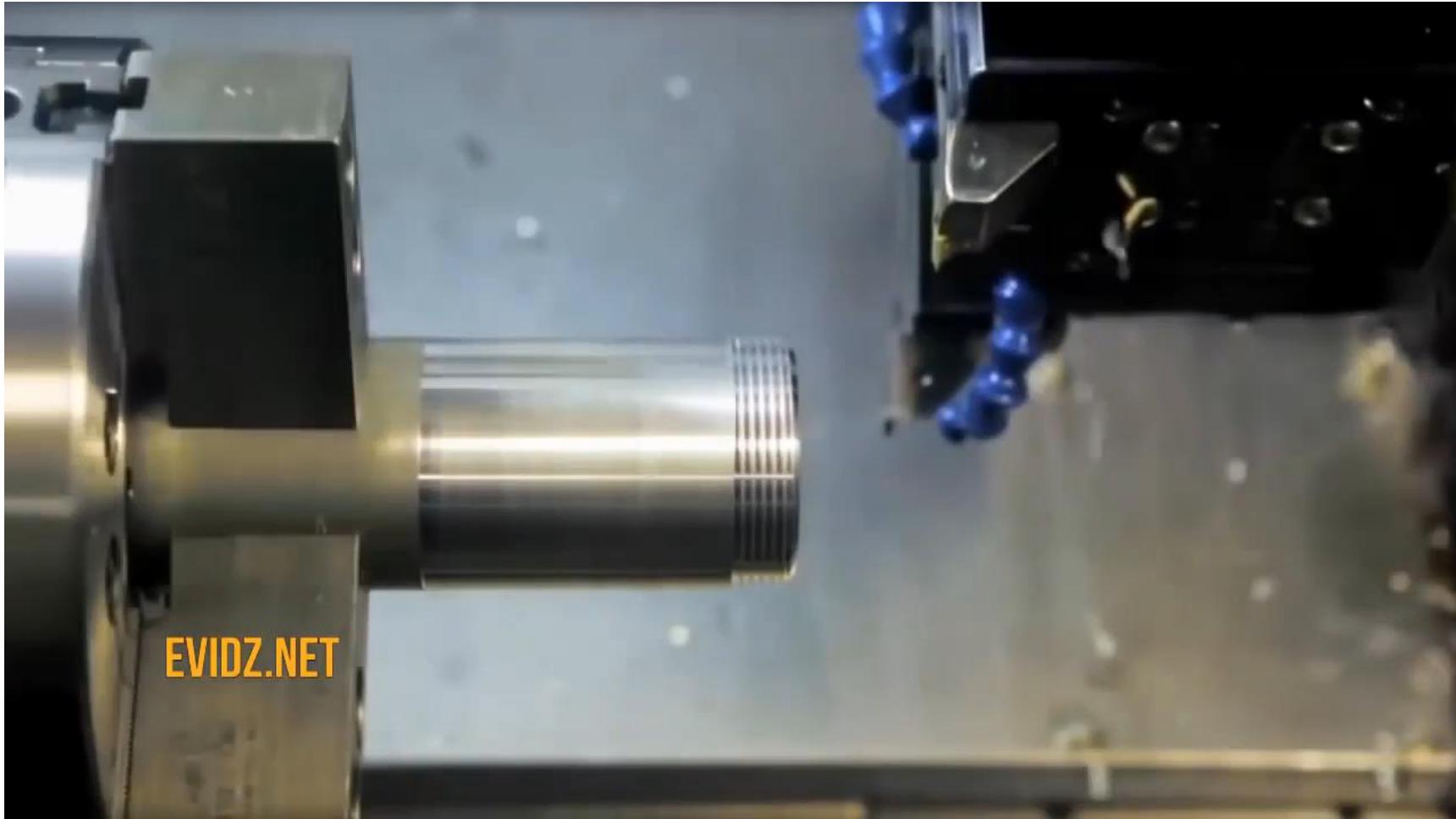


Processus de fabrication (1/2)

- Usinage des pièces à l'aide d'une machine à contrôle numérique (CNC) qui fonctionne par un processus d'enlèvement de matière.
- La machine est sous la responsabilité d'un opérateur qui gère :
 - Remplacement des outils
 - Gestion des non-conformités
 - Ajout de matière première
- Des robots sont utilisés afin d'automatiser le processus de contrôle qualité.
- Un lot d'un certain nombre de pièces identiques est appelé « job », elles ont un nombre de tâches qui ont un ordre prédéfini.



Exemple CNC



CONSORTIUM DE RECHERCHE EN INGÉNIERIE
DES SYSTÈMES INDUSTRIELS 4.0



UNIVERSITÉ
LAVAL

Processus de fabrication (2/2)

- Des tâches ont aussi lieu sur divers centres de travail avant et après l'étape d'usinage.
- Avant l'usinage :
 - Préparation du matériel et des outils
 - Découpe
- Après l'usinage :
 - Polissage
 - Contrôle qualité additionnel
 - Assemblage
 - Sous-traitance
 - Emballage
- Actuellement les tâches sont effectuées selon une politique « FIFO » (First In First Out).



Problématique

- La façon actuelle de déterminer les flux monétaires est en utilisant une règle du pouce qui exclut de nombreux facteurs.
- Impossible d'identifier les retards potentiels car on ne sait pas à quel moment les tâches de chaque job seront complétées.
- Est-ce que la façon de faire actuelle est la meilleure ?
- Pas de façon de quantifier l'impact de certaines décisions
 - Réduction ou augmentation de la main d'œuvre
 - Réduction du temps en sous-traitance



Contexte

- Un projet antérieur (Ménard, 2021) en collaboration avec le consortium a déjà été effectué pour l'ordonnancement des « jobs » sur les machines.
- Dans ce cas-ci, on s'intéresse donc uniquement à l'ordonnancement des tâches en aval de celles réalisées sur les machines.



Objectifs

- Déterminer les flux monétaires selon la politique FIFO actuelle et les règles d'affaire en place.
- Maximiser les flux monétaires en proposant un ordonnancement des tâches qui ne suit pas la politique FIFO.
- Effectuer des analyses de scénarios en mode « what if? »
 - Qu'est-ce qui se passe si un opérateur est ajouté au centre de travail du polissage ?
 - Quelle est l'opération la plus critique ?
 - Quel est l'impact de ...



Sources de données

- Deux systèmes utilisés par l'entreprise qui seront des sources de données.
- Système de gestion de la production développé à l'interne nommé *Liggo*.
 - Temps de fin estimé des tâches en cours
 - Non conformités
- Logiciel ERP (Entreprise Ressource Planning) utilisé est *Microsoft Dynamics Business Central*.
 - Étapes de production
 - Inventaire
 - Ordre de ventes
 - Ordre d'achats
 - Etc.



Microsoft Dynamics 365
Business Central



CONSORTIUM DE RECHERCHE EN INGÉNIERIE
DES SYSTÈMES INDUSTRIELS 4.0



UNIVERSITÉ
LAVAL

Défi du traitement des données

- Représente une partie importante du projet.
- Multiples sources de données amènent une complexité additionnelle.
- Traitement des données en entier à partir des bases de données contenant les données brutes des deux systèmes.
- Pas immunisé aux erreurs dans les données qui affectent grandement le résultat des modèles.

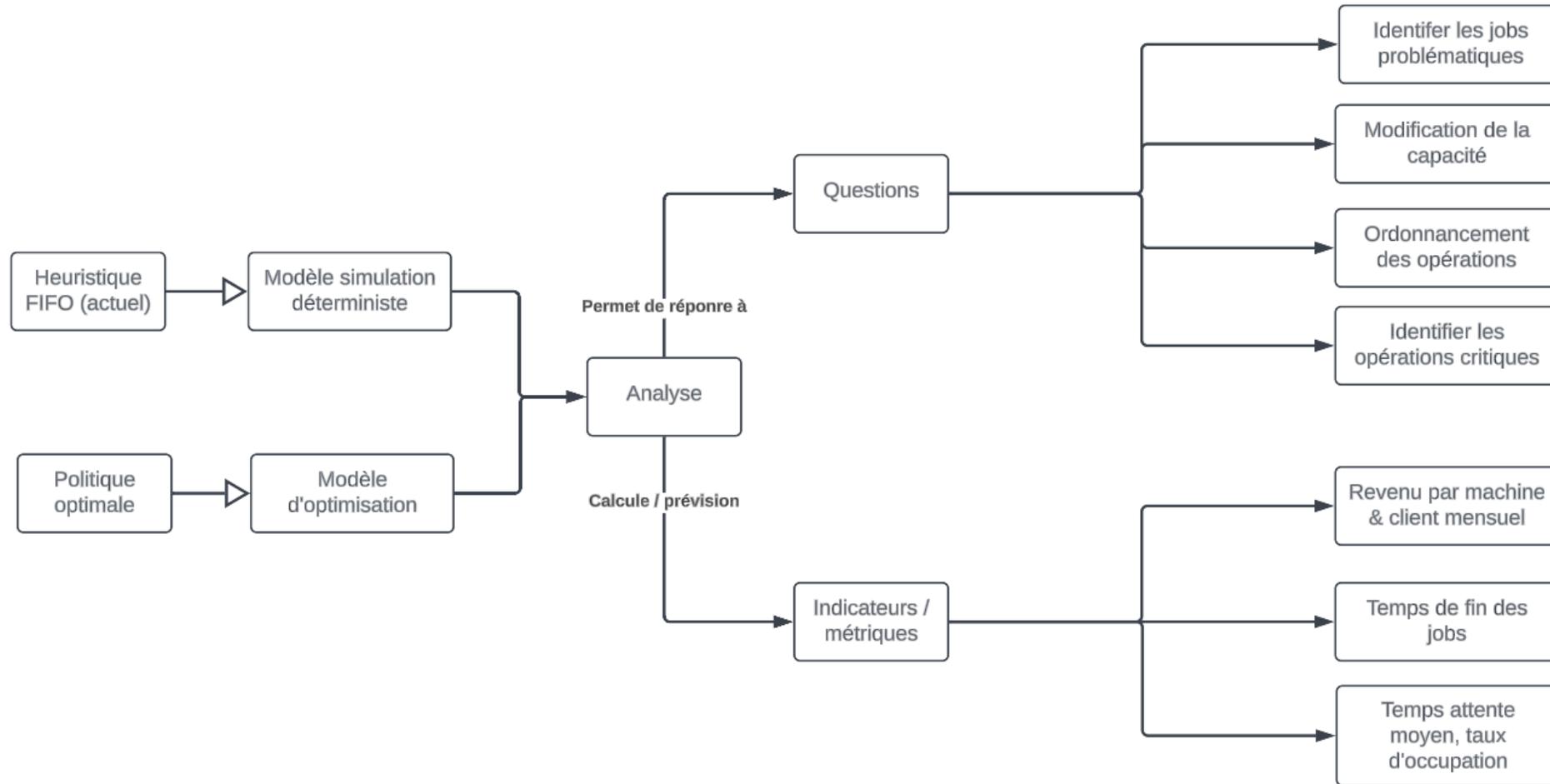


Données utilisées dans les modèles

- Pour chaque tâche :
 - Temps de libération
 - Temps de traitement
 - Temps d'attente
 - Temps de livraison
 - Précédence
 - Revenu
 - Centre de travail affecté
- Pour les centres de travail :
 - Capacité
- Transformation de données:
 - Calcul du revenu, date de livraison → ordres de vente, inventaire
 - Calcul de la date de libération → disponibilité de la matière première, ordre d'achats
 - Calcul de la précédence → sous-composantes nécessaires



Pour y arriver



Simulation déterministe à événements discrets

- À ne pas confondre avec un modèle de simulation continue comme le serait une modélisation d'un système météorologique (interactions constantes entre les vents, la pression atmosphérique, température, etc.)
- Temps divisé en intervalles discrets.
- Des événements provoquent des changements d'état
 - Arrivée d'un client à une caisse rend la caisse occupée.
- Se déroule en avançant dans le temps en fonction des événements
 - Arrivée d'un client au temps 1, arrivé d'un autre au temps 3, départ du premier au temps 4, etc.
- Déterministe car dans ce cas les temps ne sont pas stochastiques, la simulation donnera toujours le même résultat.



Modèle de simulation déterministe

- Réalisé avec la librairie de simulation *SimPy*.
- Suit la politique FIFO employée actuellement.
- Prend en entrée les données mentionnées précédemment, retourne en sortie les temps de début et de fin des tâches.
- Permet de prendre en compte la capacité des machines, les besoins de sous-composantes, etc. il est donc plus complet que la règle du pouce utilisée.
- Servira aussi de scénario de base afin de pouvoir quantifier le gain obtenu grâce au modèle d'optimisation.



Programmation par contraintes

- La programmation par contraintes (aussi appelée CP) est un paradigme de programmation dans lequel les problèmes sont formulés à l'aide de variables dont les valeurs sont restreintes par des contraintes.
- Permet de définir un ensemble de variables, leurs domaines de valeurs possibles, ainsi que des contraintes qui régissent les relations entre ces variables.
- L'objectif est de trouver une solution qui satisfait toutes les contraintes et optimise la fonction objectif, en utilisant des techniques de recherche (des solveurs) pour explorer efficacement l'espace de solutions.



Formulation du modèle d'optimisation

Ensembles :

J : ensemble des tâches

C : ensemble des centres de travail

Q : ensemble des précédences entre les tâches

T : ensemble des périodes de temps

Paramètres :

t_{max} : horizon de planification

k_j : temps de libération de la tâche j

d_j : temps de livraison de la tâche j

p_j : temps de traitement de la tâche j

m_j : revenu de la tâche j

w_j : centre de travail de la tâche j

g_c : capacité du centre de travail c

f_t : facteur de dépréciation du temps t

Variables :

$S_j \in \{0, \dots, t_{max}\}$: temps de départ d'une tâche

$R \in \{0, \dots, \sum_{j \in J} m_j \times 1\}$: revenu total

Contraintes :

$$S_j \geq k_j \quad \forall j \in J$$

$$S_a + p_a \leq S_b \quad \forall (a, b) \in Q$$

$$R = \sum_{j \in J} m_j \times f_{max(S_j + p_j, d_j)} \quad \forall j \in J$$

$$Cumulative(S_c, p_c, 1, g_c) \quad \forall c \in C$$

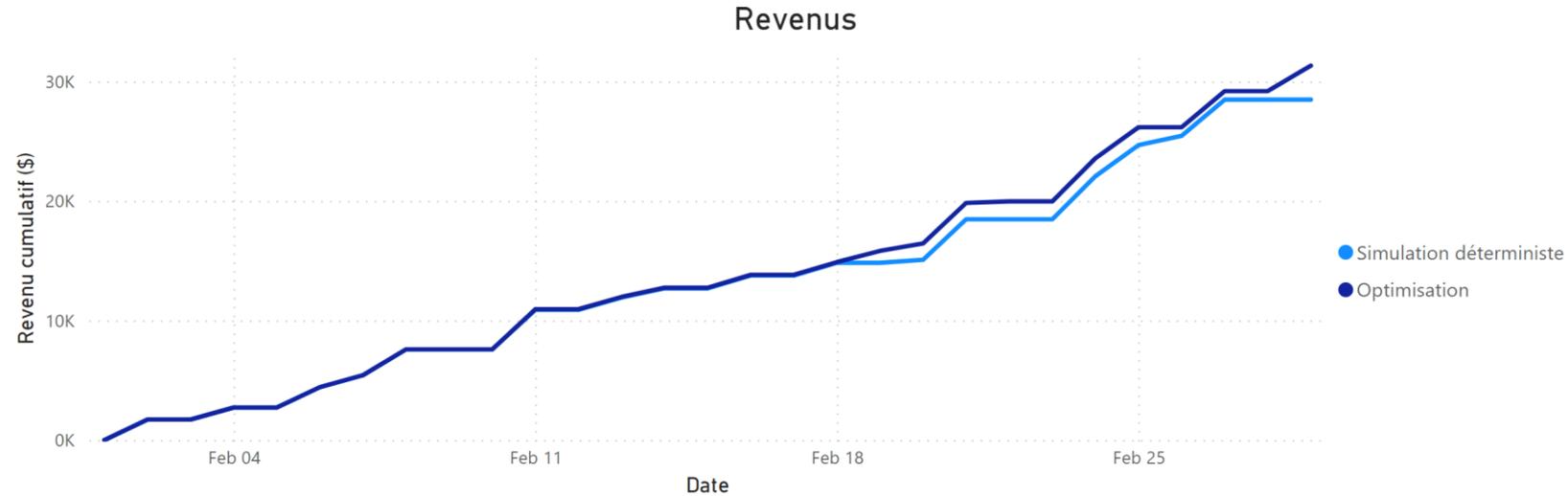


Modèle d'optimisation

- Modélisé dans *Minizinc* en utilisant le solveur *Chuffed*.
- Heuristique de recherche *smallest* sur les temps de début des tâches.
- Un modèle de *Mixed Integer Programming* (MIP) a aussi été testé mais n'était pas performant sur des tailles d'instances réelles.
 - La programmation par contraintes permet d'utiliser des algorithmes de filtrage plus efficaces qu'un MIP dans ce cas
 - *Chuffed* utilise les « no goods », ce qui permet d'apprendre à partir des recherches infructueuses faites dans l'arbre de recherche et ainsi accélérer le filtrage.



Résultats

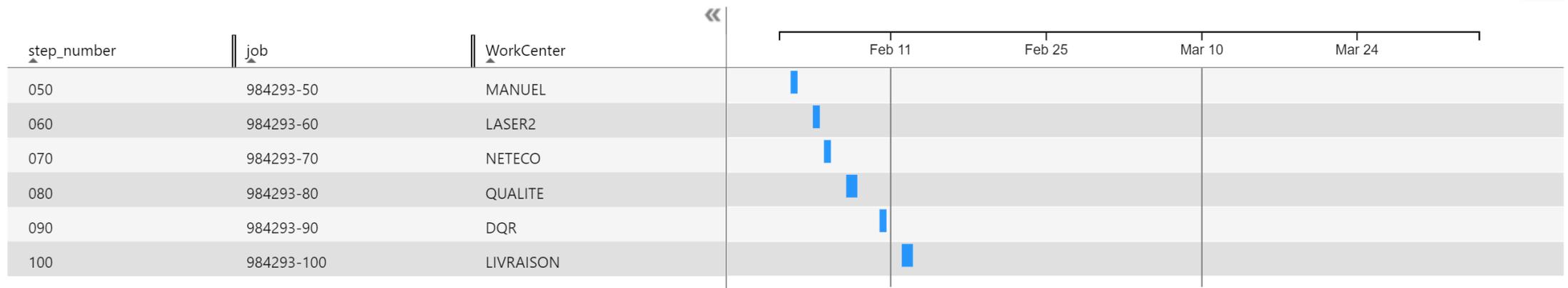


Simulation déterministe

28.48K

Optimisation

31.33K



Module de scénario « what if? »

- Permet de tester différents scénarios à l'aide des deux modèles.
- Fonctionne en modifiant les données d'entrées du modèle et en exécutant le modèle une ou plusieurs fois.
 - Une seul fois si l'objectif est de tester un scénario précis.
 - Plusieurs fois si le but est de déterminer la tâche la plus critique.
- Efficacité dépend du temps de résolution du modèle :
 - Modèle de simulation déterministe : ≈ 10 secondes
 - Modèle d'optimisation : ≈ 10 minutes (solution pas nécessairement optimal)



Résultats

- À quel poste assigner un nouvel opérateur ?

Centre de travail	Valeur fonction objectif
Nettoyage	31 024.56
Polissage	30 956.23
Livraison	30 245.97

- Quelle est l'opération la plus critique ?

Job	Centre de travail	Valeur fonction objectif
977943-50	Laser-2	27 962.18
875364-40	Qualité	28 206.82
1008453-90	Neteco	28 472.03



Conclusion

- Le modèle de simulation déterministe est un outil efficace pour prévoir les flux monétaires chez le partenaire industriel.
- Continuer de raffiner le modèle en implantant d'autres règles d'affaires et s'ajuster selon le retour de la production.
- Le modèle d'optimisation présente des gains intéressants ce qui suggère qu'il y aurait avantage à laisser tomber la politique FIFO au profit d'un ordonnancement obtenu grâce au modèle
- L'utilisation de l'ordonnancement proposé par le modèle d'optimisation présente un défi d'adaptation.



Merci !



**CONSORTIUM DE RECHERCHE EN INGÉNIERIE
DES SYSTÈMES INDUSTRIELS 4.0**



**UNIVERSITÉ
LAVAL**