



**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.

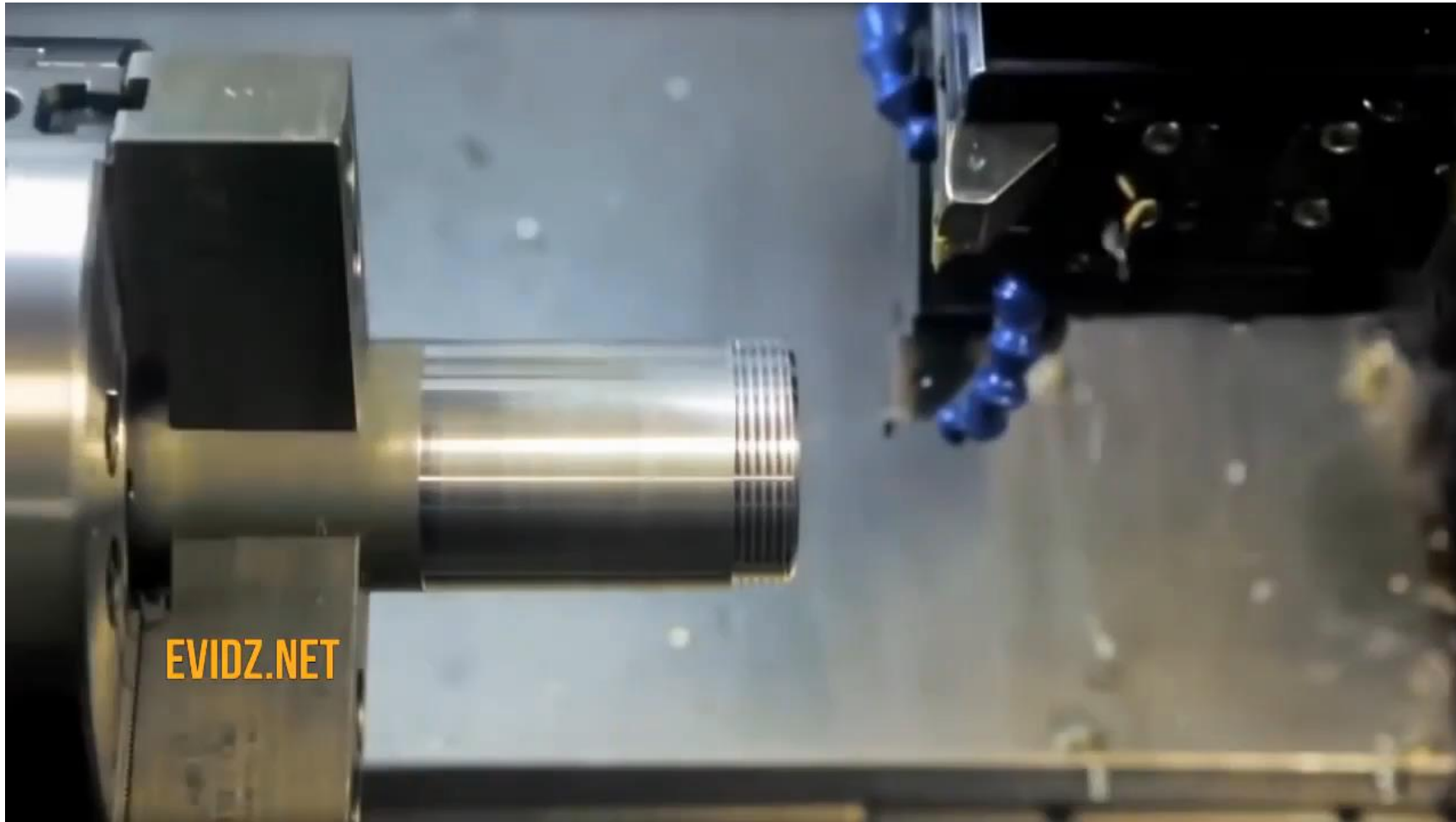


## Processus de fabrication (1/2)

- 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



# 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.

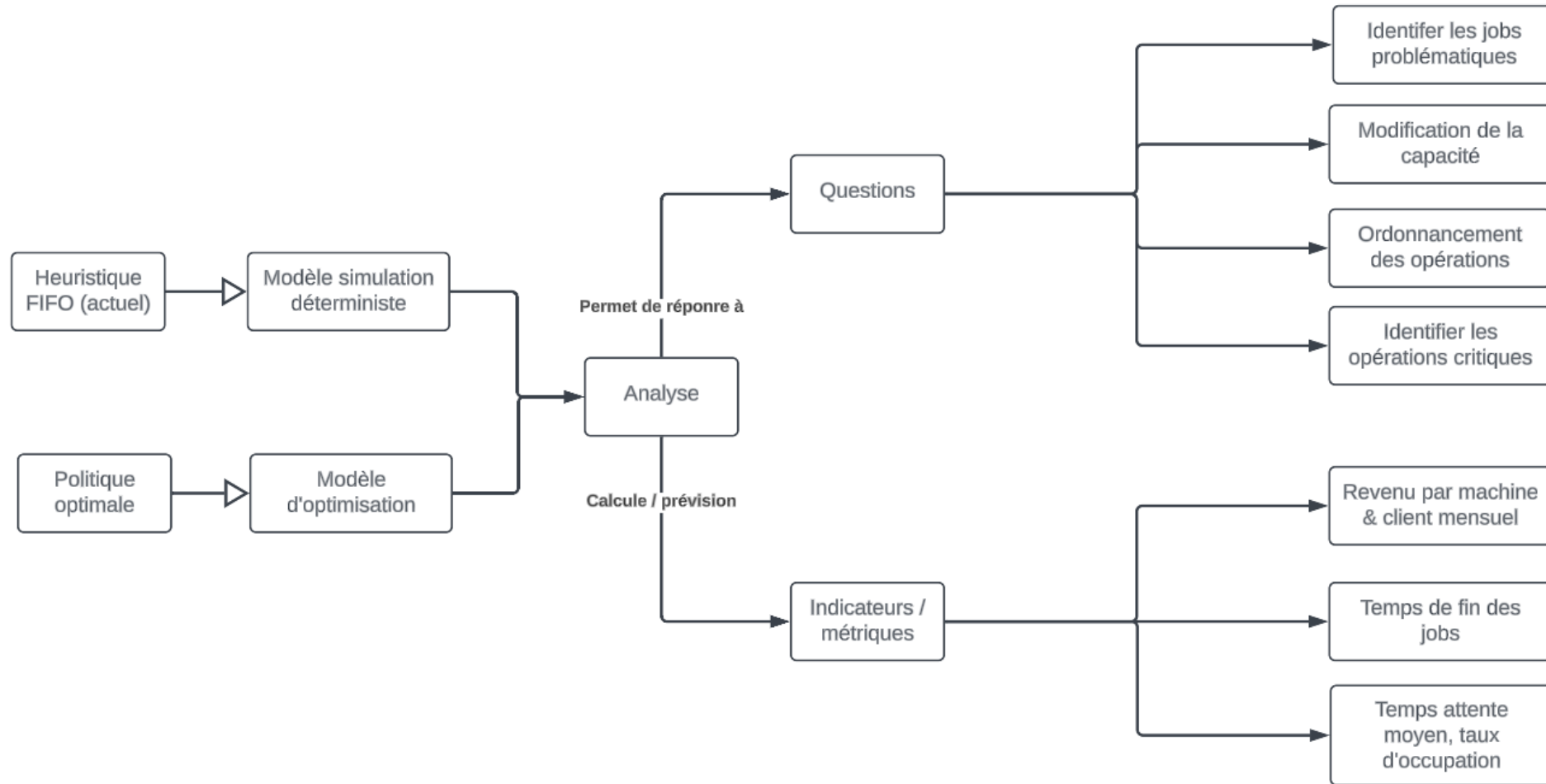


# Données utilisées dans les modèles

- 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 :

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

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

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

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



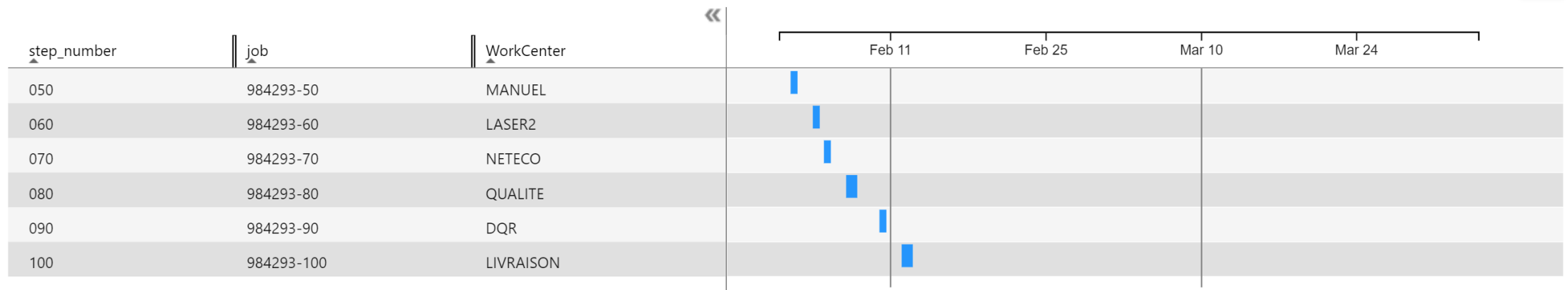
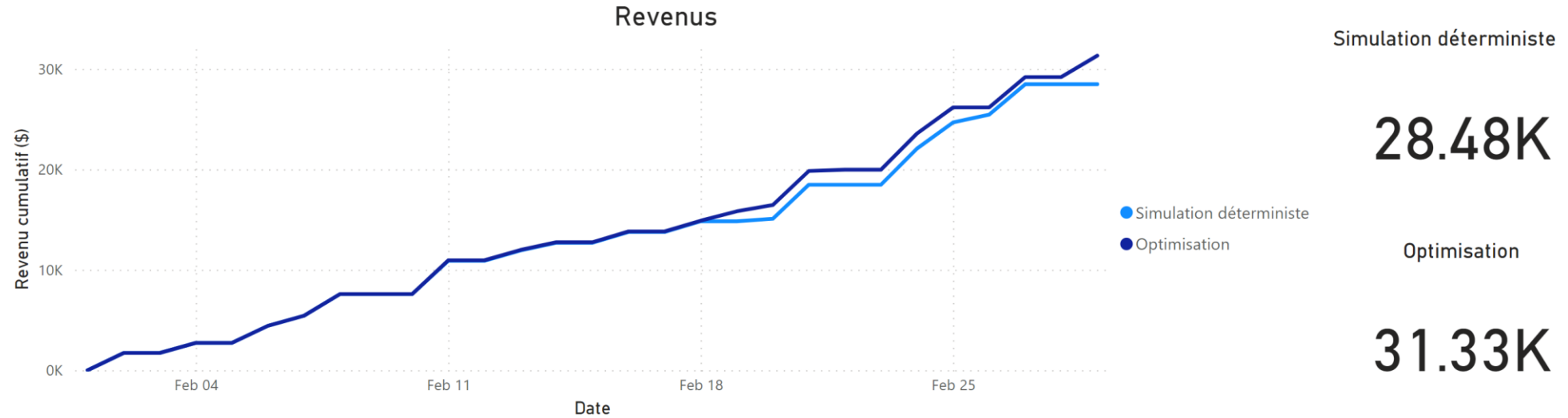


# Modèle d'optimisation

- 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



## 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 :  $\approx 10$  secondes
  - Modèle d'optimisation :  $\approx 10$  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**