

Réduire les déchets de production : ordonnancement bi-objectif sur une machine unique avec réentrance



Session GT Bermudes, 9/10/2017

Corentin Le Hesran, doctorant 2^e année, INSA Lyon, DISP

Encadrants: Valérie Botta-Genoulaz, Université de Lyon, INSA Lyon, DISP

Valérie Laforest, Université de Lyon, EMSE, EVS

Anne-Laure Ladier, Université de Lyon, INSA Lyon, DISP

Thèse doctorale soutenue financièrement par



UNIVERSITÉ
LUMIÈRE
LYON 2

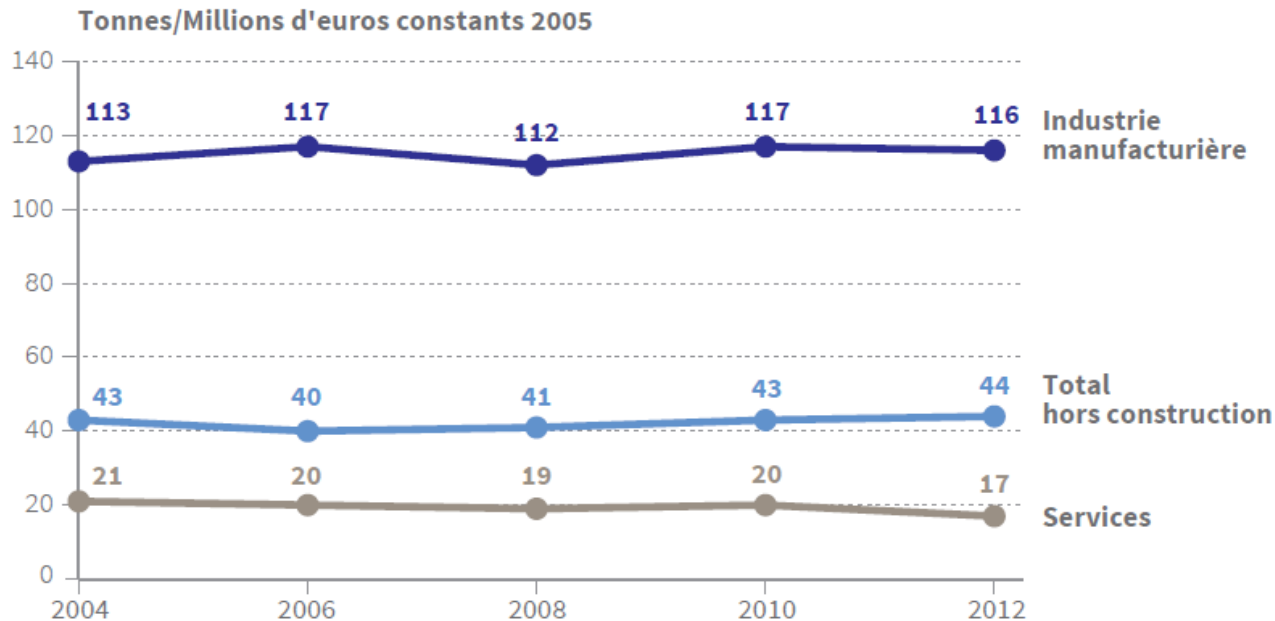


- Contexte
- Tâches couplées: positionnement
- Modèle mathématique
- Expérimentations numériques et résultats
- Conclusion et perspectives

CONTEXTE

Contexte

- 24 millions de tonnes de déchets industriels produites en 2012, dont 2.8 de déchets dangereux
- 4.9 milliards d'euros dépensés par les entreprises



Tonnes de déchets produites par million d'euros de valeur ajoutée

Source: ADEME, 2016

Contexte

Articles scientifiques traitant de la planification des opérations en production durable:

- 92 % concernent l'énergie
- 7% abordent le thème des déchets

Sustainability in manufacturing operations scheduling: A state of the art review.
Giret et al, *Journal of manufacturing systems*, 2015

Grau et al (1994)
Focusing in by-product recovery
and waste minimization in batch
production scheduling

Inclusion des coûts environnementaux
Utilisation d'un index de pollution

Adonyi et al (2008)
Effective scheduling of a
large-scale paint
production system

Optimisation bi-objectif
Ordonnements alternatifs
Utilisation de S-Graph

**Industrie
Chimique**

TACHES COUPLÉES: POSITIONNEMENT

Taches couplées: positionnement

- Planifier la production sur une ligne de peinture pour réduire la production de déchets et minimiser les coûts d'inventaire:

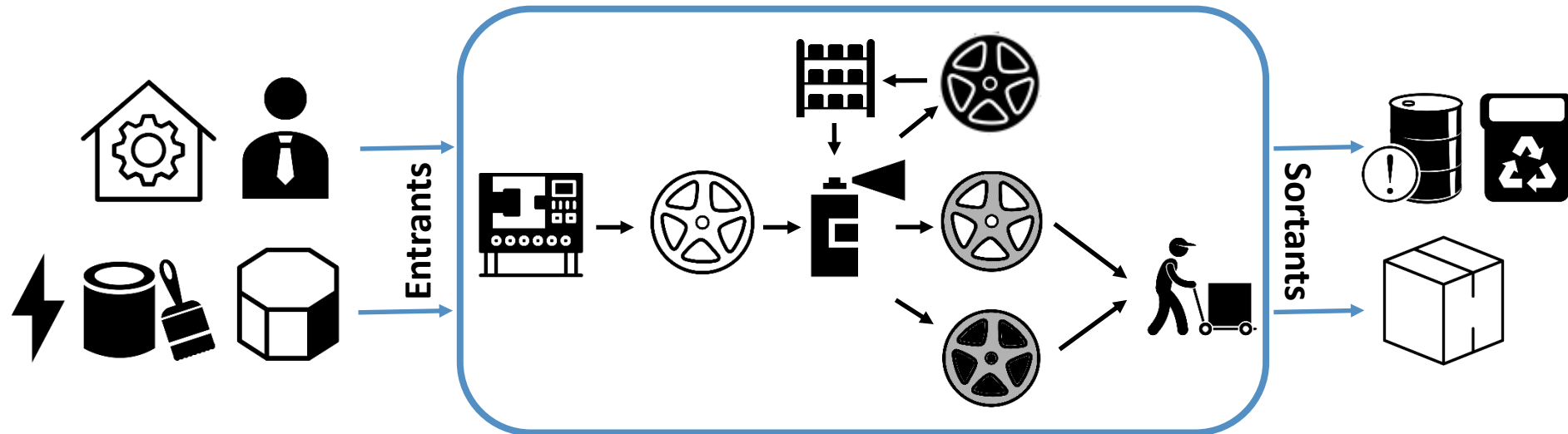


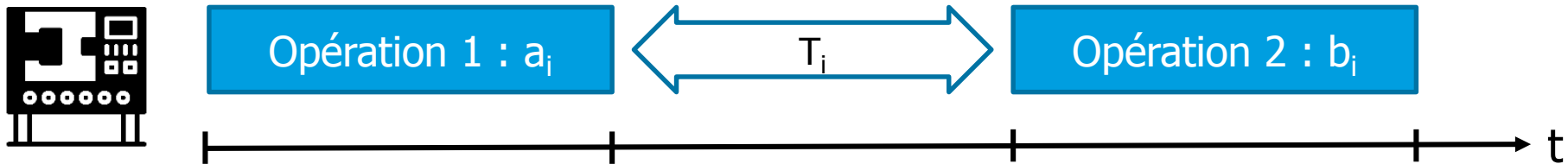
Schéma du fonctionnement d'une ligne de peinture

Fonctionnement en juste-à-temps: Dates d'échéance
Stock d'en-cours et de produits finis

Ordonnancement avec tâches couplées

Taches couplées: positionnement

- Shapiro., 1980: Scheduling coupled tasks (*Naval Research Logistics Quarterly*)
 - Un job comprenant deux opérations réalisées sur une même machine.
 - Une durée exacte T_i doit s'écouler entre les deux opérations



Notation étendue de Graham:

1 | Coup-task (a_i, T_i, b_i) | -

Taches couplées: positionnement

Problèmes d'ordonnancement avec tâches couplées



Complexité du problème

Gupta (1996)
Orman and Potts (1997)

Problème NP-Difficile

Temps de calcul important



Méthodes de résolution

Blazewicz et al (2012)
Condotta et al (2012)

Prédominance des heuristiques
Minimisation du makespan

Programmation Linéaire à Variables Mixtes
Due Dates



Autres travaux

Winter et al (2007)
Blazewicz (2010)

Minimisation des délais
Ordonnancement avec sequence dependence

Optimisation bi-objectif

Ordonnancement avec réentrance

Taches couplées: positionnement

- Plusieurs opérations d'un même job peuvent être réalisées sur une même machine

Manne 1960

- Programmation linéaire pour un modèle de Job-Shop

~~Contrainte de réentrance~~

Chen et Chao-Hsien Pan (2006)

- Programmation linéaire pour un modèle de job-shop avec réentrance

~~Contrainte d'exécution d'opérations consécutives~~

Programme Linéaire à Variables Mixtes

- Programmation linéaire a variables mixtes pour le cas machine unique avec réentrance

MODÈLE MATHÉMATIQUE

■ Variables de décision

Y_{ijkl} : vaut 1 si (i,j) a lieu juste avant (k,l), 0 sinon

s_{ij} : starting time de (i,j)

t_{ij} : temps de séchage après (i,j)

e_i : avance du job i sur sa due date

g_{ij} : temps d'attente machine entre (i,j) et la prochaine opération

Modèle mathématique

$$\min z_{\text{inventory}} = \sum_{i \in \mathcal{I}} Q_i (e_i + t_i - T)$$

$$\min z_{\text{setup}} = \sum_{i,j,k > i,l} Y_{ijkl} y_{ijkl}$$

$$\text{s.t. } s_{ij} + P_{ij} + t_{i,j} \leq s_{i,j+1} \quad \forall i \in \mathcal{I}, j \in \{1, \dots, N_i - 1\}$$

$$e_i = D_i - s_{i,N_i} - P_{i,N_i} \quad \forall i \in \mathcal{I}$$

$$s_{ij} + P_{ij} + g_{ij} + M(1 - y_{ijkl}) \geq s_{kl} \quad \forall (i,k) \in \{\mathcal{I}^2 | k \neq i\}, j \in \{1, \dots, N_i\}, l \in \{1, \dots, N_k\}$$

$$s_{ij} + P_{ij} + g_{ij} \leq M(1 - y_{ijkl}) + s_{kl} \quad \forall (i,k) \in \{\mathcal{I}^2 | k \neq i\}, j \in \{1, \dots, N_i\}, l \in \{1, \dots, N_k\}$$

$$\sum_{i \in \mathcal{I}} \sum_{j=1}^{N_i} \sum_{k \in \mathcal{I}, k \neq i} \sum_{l=1}^{N_k} y_{ijkl} = \sum_{i \in \mathcal{I}} N_i - 1$$

$$\sum_{i \in \mathcal{I}} \sum_{j=1}^{N_i} g_{ij} + \sum_{i \in \mathcal{I}} \sum_{j=1}^{N_i} P_{ij} = M$$

$$\sum_{k \in \mathcal{I}} \sum_{l=1}^{N_k} y_{ijkl} \leq 1 \quad \forall i \in \mathcal{I}, j \in \{1, \dots, N_i\}$$

$$\sum_{k \in \mathcal{I}} \sum_{l=1}^{N_k} y_{kl ij} \leq 1 \quad \forall i \in \mathcal{I}, j \in \{1, \dots, N_i\}$$

$$t_{ij} \geq T \quad \forall i \in \{\mathcal{I}, |N_i > 1\}, \forall j \in \mathcal{J}$$

$$s_{ij}, t_i, e_i, g_{ij} \geq 0 \quad \forall i \in \mathcal{I}, j \in \mathcal{J}$$

$$y_{ijkl} \in \{0, 1\} \quad \forall i \in \mathcal{I}, j \in \mathcal{J}, k \in \mathcal{I}, l \in \mathcal{J}$$

Modèle mathématique

$$\min z_{\text{inventory}} = \sum_{i \in \mathcal{I}} Q_i (e_i + t_i - T)$$

$$\min z_{\text{setup}} = \sum_{i,j,k>i,l} Y_{ijkl} y_{ijkl}$$

$$\text{s.t. } s_{ij} + P_{ij} + t_{i,j} \leq s_{i,j+1} \quad \forall i \in \mathcal{I}, j \in \{1, \dots, N_i - 1\}$$

$$e_i = D_i - s_{i,N_i} - P_{i,N_i} \quad \forall i \in \mathcal{I}$$

$$s_{ij} + P_{ij} + g_{ij} + M(1 - y_{ijkl}) \geq s_{kl} \quad \forall (i,k) \in \{\mathcal{I}^2 | k \neq i\}, j \in \{1, \dots, N_i\}, l \in \{1, \dots, N_k\}$$

$$s_{ij} + P_{ij} + g_{ij} \leq M(1 - y_{ijkl}) + s_{kl} \quad \forall (i,k) \in \{\mathcal{I}^2 | k \neq i\}, j \in \{1, \dots, N_i\}, l \in \{1, \dots, N_k\}$$

$$\sum_{i \in \mathcal{I}} \sum_{j=1}^{N_i} \sum_{k \in \mathcal{I}, k \neq i} \sum_{l=1}^{N_k} y_{ijkl} = \sum_{i \in \mathcal{I}} N_i - 1$$

$$\sum_{i \in \mathcal{I}} \sum_{j=1}^{N_i} g_{ij} + \sum_{i \in \mathcal{I}} \sum_{j=1}^{N_i} P_{ij} = M$$

$$\sum_{k \in \mathcal{I}} \sum_{l=1}^{N_k} y_{ijkl} \leq 1 \quad \forall i \in \mathcal{I}, j \in \{1, \dots, N_i\}$$

$$\sum_{k \in \mathcal{I}} \sum_{l=1}^{N_k} y_{kl ij} \leq 1 \quad \forall i \in \mathcal{I}, j \in \{1, \dots, N_i\}$$

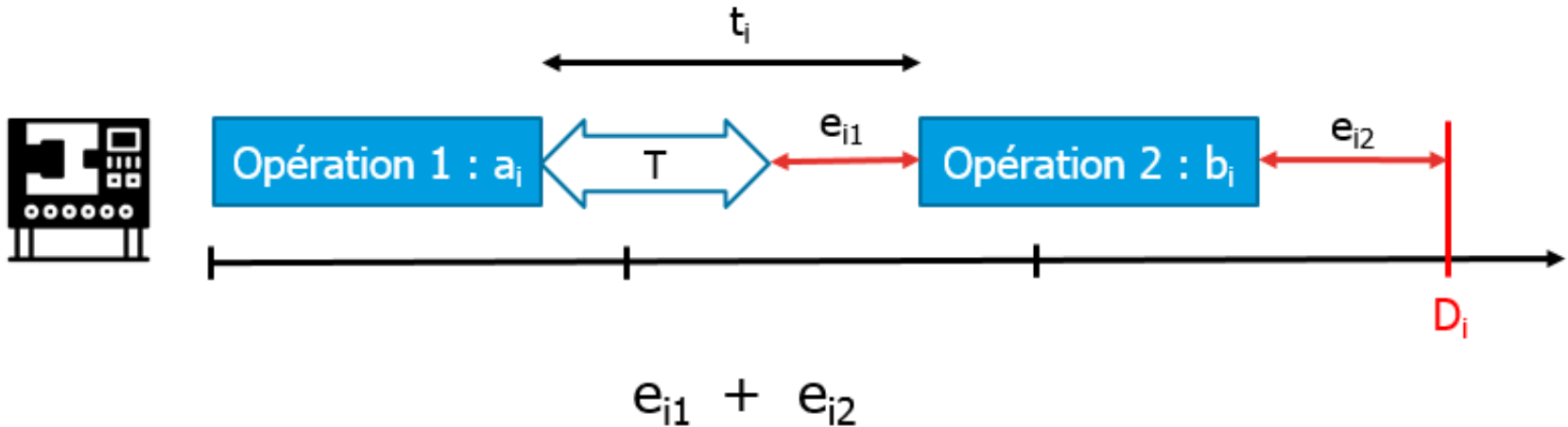
$$t_{ij} \geq T \quad \forall i \in \{\mathcal{I}, |N_i > 1\}, \forall j \in \mathcal{J}$$

$$s_{ij}, t_i, e_i, g_{ij} \geq 0 \quad \forall i \in \mathcal{I}, j \in \mathcal{J}$$

$$y_{ijkl} \in \{0, 1\} \quad \forall i \in \mathcal{I}, j \in \mathcal{J}, k \in \mathcal{I}, l \in \mathcal{J}$$

Modèle mathématique

$$z_{\text{inventory}} = \sum_{i \in \mathcal{I}} Q_i (e_i + t_i - T)$$



Modèle mathématique

$$\min z_{\text{inventory}} = \sum_{i \in \mathcal{I}} Q_i(e_i + t_i - T)$$

$$\min z_{\text{setup}} = \sum_{i,j,k>i,l} Y_{ijkl} y_{ijkl}$$

$$\text{s.t. } s_{ij} + P_{ij} + t_{i,j} \leq s_{i,j+1} \quad \forall i \in \mathcal{I}, j \in \{1, \dots, N_i - 1\}$$

$$e_i = D_i - s_{i,N_i} - P_{i,N_i} \quad \forall i \in \mathcal{I}$$

$$s_{ij} + P_{ij} + g_{ij} + M(1 - y_{ijkl}) \geq s_{kl} \quad \forall (i, k) \in \{\mathcal{I}^2 | k \neq i\}, j \in \{1, \dots, N_i\}, l \in \{1, \dots, N_k\}$$

$$s_{ij} + P_{ij} + g_{ij} \leq M(1 - y_{ijkl}) + s_{kl} \quad \forall (i, k) \in \{\mathcal{I}^2 | k \neq i\}, j \in \{1, \dots, N_i\}, l \in \{1, \dots, N_k\}$$

$$\sum_{i \in \mathcal{I}} \sum_{j=1}^{N_i} \sum_{k \in \mathcal{I}, k \neq i} \sum_{l=1}^{N_k} y_{ijkl} = \sum_{i \in \mathcal{I}} N_i - 1$$

$$\sum_{i \in \mathcal{I}} \sum_{j=1}^{N_i} g_{ij} + \sum_{i \in \mathcal{I}} \sum_{j=1}^{N_i} P_{ij} = M$$

$$\sum_{k \in \mathcal{I}} \sum_{l=1}^{N_k} y_{ijkl} \leq 1$$

$$\forall i \in \mathcal{I}, j \in \{1, \dots, N_i\}$$

$$\sum_{k \in \mathcal{I}} \sum_{l=1}^{N_k} y_{kl ij} \leq 1$$

$$\forall i \in \mathcal{I}, j \in \{1, \dots, N_i\}$$

$$t_{ij} \geq T$$

$$\forall i \in \{\mathcal{I}, |N_i > 1\}, \forall j \in \mathcal{J}$$

$$s_{ij}, t_i, e_i, g_{ij} \geq 0$$

$$\forall i \in \mathcal{I}, j \in \mathcal{J}$$

$$y_{ijkl} \in \{0, 1\}$$

$$\forall i \in \mathcal{I}, j \in \mathcal{J}, k \in \mathcal{I}, l \in \mathcal{J}$$

Modèle mathématique

$$z_{\text{setup}} = \sum_{i,j,k > i,l} Y_{ijkl} y_{ijkl}$$

| $(k,l) \backslash (i,j)$ | B | N |
|--------------------------|----------|----------|
| B | 0 | 1 |
| N | 1 | 0 |

Valeur de Y_{ijkl} selon les types de (i,j) et (k,l)

Modèle mathématique

$$\min z_{\text{inventory}} = \sum_{i \in \mathcal{I}} Q_i (e_i + t_i - T)$$

$$\min z_{\text{setup}} = \sum_{i,j,k>i,l} Y_{ijkl} y_{ijkl}$$

$$\text{s.t. } \begin{cases} s_{ij} + P_{ij} + t_{i,j} \leq s_{i,j+1} & \forall i \in \mathcal{I}, j \in \{1, \dots, N_i - 1\} \\ e_i = D_i - s_{i,N_i} - P_{i,N_i} & \forall i \in \mathcal{I} \end{cases}$$

$$s_{ij} + P_{ij} + g_{ij} + M(1 - y_{ijkl}) \geq s_{kl} \quad \forall (i, k) \in \{\mathcal{I}^2 | k \neq i\}, j \in \{1, \dots, N_i\}, l \in \{1, \dots, N_k\}$$

$$s_{ij} + P_{ij} + g_{ij} \leq M(1 - y_{ijkl}) + s_{kl} \quad \forall (i, k) \in \{\mathcal{I}^2 | k \neq i\}, j \in \{1, \dots, N_i\}, l \in \{1, \dots, N_k\}$$

$$\sum_{i \in \mathcal{I}} \sum_{j=1}^{N_i} \sum_{k \in \mathcal{I}, k \neq i} \sum_{l=1}^{N_k} y_{ijkl} = \sum_{i \in \mathcal{I}} N_i - 1$$

$$\sum_{i \in \mathcal{I}} \sum_{j=1}^{N_i} g_{ij} + \sum_{i \in \mathcal{I}} \sum_{j=1}^{N_i} P_{ij} = M$$

$$\sum_{k \in \mathcal{I}} \sum_{l=1}^{N_k} y_{ijkl} \leq 1 \quad \forall i \in \mathcal{I}, j \in \{1, \dots, N_i\}$$

$$\sum_{k \in \mathcal{I}} \sum_{l=1}^{N_k} y_{kl ij} \leq 1 \quad \forall i \in \mathcal{I}, j \in \{1, \dots, N_i\}$$

$$t_{ij} \geq T \quad \forall i \in \{\mathcal{I}, |N_i > 1\}, \forall j \in \mathcal{J}$$

$$s_{ij}, t_i, e_i, g_{ij} \geq 0 \quad \forall i \in \mathcal{I}, j \in \mathcal{J}$$

$$y_{ijkl} \in \{0, 1\} \quad \forall i \in \mathcal{I}, j \in \mathcal{J}, k \in \mathcal{I}, l \in \mathcal{J}$$

Modèle mathématique

$$s_{ij} + P_{ij} + t_{i,j} \leq s_{i,j+1}, \forall i \in \mathcal{I}, j \in \{1, \dots, N_i - 1\}$$

Ordre des opérations d'un même job

$$e_i = D_i - s_{i,N_i} - P_{i,N_i} \forall i \in \mathcal{I}$$

Avance sur due date

Modèle mathématique

$$\min z_{\text{inventory}} = \sum_{i \in \mathcal{I}} Q_i (e_i + t_i - T)$$

$$\min z_{\text{setup}} = \sum_{i,j,k>i,l} Y_{ijkl} y_{ijkl}$$

$$\text{s.t. } s_{ij} + P_{ij} + t_{i,j} \leq s_{i,j+1} \quad \forall i \in \mathcal{I}, j \in \{1, \dots, N_i - 1\}$$

$$e_i = D_i - s_{i,N_i} - P_{i,N_i} \quad \forall i \in \mathcal{I}$$

$$s_{ij} + P_{ij} + g_{ij} + M(1 - y_{ijkl}) \geq s_{kl} \quad \forall (i, k) \in \{\mathcal{I}^2 | k \neq i\}, j \in \{1, \dots, N_i\}, l \in \{1, \dots, N_k\}$$

$$s_{ij} + P_{ij} + g_{ij} \leq M(1 - y_{ijkl}) + s_{kl} \quad \forall (i, k) \in \{\mathcal{I}^2 | k \neq i\}, j \in \{1, \dots, N_i\}, l \in \{1, \dots, N_k\}$$

$$\sum_{i \in \mathcal{I}} \sum_{j=1}^{N_i} \sum_{k \in \mathcal{I}, k \neq i} \sum_{l=1}^{N_k} y_{ijkl} = \sum_{i \in \mathcal{I}} N_i - 1$$

$$\sum_{i \in \mathcal{I}} \sum_{j=1}^{N_i} g_{ij} + \sum_{i \in \mathcal{I}} \sum_{j=1}^{N_i} P_{ij} = M$$

$$\sum_{k \in \mathcal{I}} \sum_{l=1}^{N_k} y_{ijkl} \leq 1 \quad \forall i \in \mathcal{I}, j \in \{1, \dots, N_i\}$$

$$\sum_{k \in \mathcal{I}} \sum_{l=1}^{N_k} y_{kl ij} \leq 1 \quad \forall i \in \mathcal{I}, j \in \{1, \dots, N_i\}$$

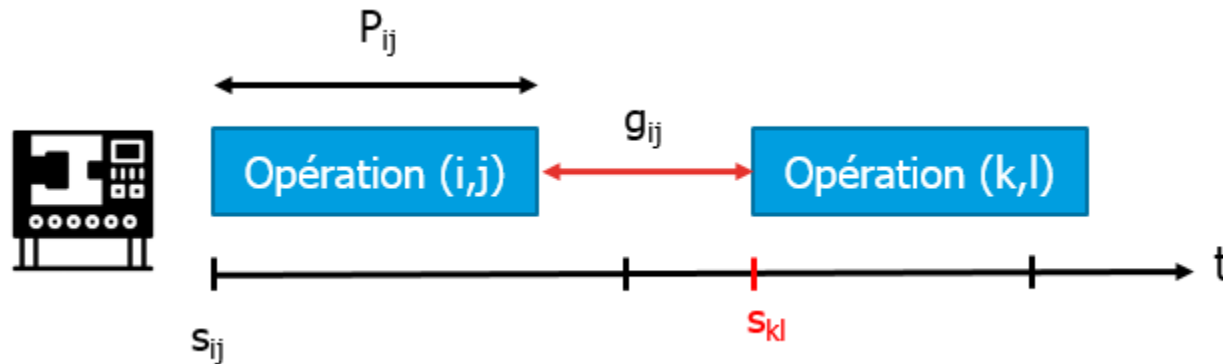
$$t_{ij} \geq T \quad \forall i \in \{\mathcal{I}, |N_i > 1\}, \forall j \in \mathcal{J}$$

$$s_{ij}, t_i, e_i, g_{ij} \geq 0 \quad \forall i \in \mathcal{I}, j \in \mathcal{J}$$

$$y_{ijkl} \in \{0, 1\} \quad \forall i \in \mathcal{I}, j \in \mathcal{J}, k \in \mathcal{I}, l \in \mathcal{J}$$

Modèle mathématique

$$y_{ijkl} = 1 \Rightarrow s_{ij} + P_{ij} + g_{ij} = s_{kl}$$



$$s_{ij} + P_{ij} + g_{ij} + M(1 - y_{ijkl}) \geq s_{kl}, \forall (i, k) \in \{\mathcal{I}^2 | k \neq i\}, j \in \{1, \dots, N_i\}, l \in \{1, \dots, N_k\}$$

$$s_{ij} + P_{ij} + g_{ij} \leq M(1 - y_{ijkl}) + s_{kl}, \forall (i, k) \in \{\mathcal{I}^2 | k \neq i\}, j \in \{1, \dots, N_i\}, l \in \{1, \dots, N_k\}$$

Existence d'un seul prédécesseur

Modèle mathématique

$$\min z_{\text{inventory}} = \sum_{i \in \mathcal{I}} Q_i (e_i + t_i - T)$$

$$\min z_{\text{setup}} = \sum_{i,j,k>i,l} Y_{ijkl} y_{ijkl}$$

$$\text{s.t. } s_{ij} + P_{ij} + t_{i,j} \leq s_{i,j+1} \quad \forall i \in \mathcal{I}, j \in \{1, \dots, N_i - 1\}$$

$$e_i = D_i - s_{i,N_i} - P_{i,N_i} \quad \forall i \in \mathcal{I}$$

$$s_{ij} + P_{ij} + g_{ij} + M(1 - y_{ijkl}) \geq s_{kl} \quad \forall (i, k) \in \{\mathcal{I}^2 | k \neq i\}, j \in \{1, \dots, N_i\}, l \in \{1, \dots, N_k\}$$

$$s_{ij} + P_{ij} + g_{ij} \leq M(1 - y_{ijkl}) + s_{kl} \quad \forall (i, k) \in \{\mathcal{I}^2 | k \neq i\}, j \in \{1, \dots, N_i\}, l \in \{1, \dots, N_k\}$$

$$\sum_{i \in \mathcal{I}} \sum_{j=1}^{N_i} \sum_{k \in \mathcal{I}, k \neq i} \sum_{l=1}^{N_k} y_{ijkl} = \sum_{i \in \mathcal{I}} N_i - 1$$

$$\sum_{i \in \mathcal{I}} \sum_{j=1}^{N_i} g_{ij} + \sum_{i \in \mathcal{I}} \sum_{j=1}^{N_i} P_{ij} = M$$

$$\sum_{k \in \mathcal{I}} \sum_{l=1}^{N_k} y_{ijkl} \leq 1 \quad \forall i \in \mathcal{I}, j \in \{1, \dots, N_i\}$$

$$\sum_{k \in \mathcal{I}} \sum_{l=1}^{N_k} y_{kl ij} \leq 1 \quad \forall i \in \mathcal{I}, j \in \{1, \dots, N_i\}$$

$$t_{ij} \geq T \quad \forall i \in \{\mathcal{I}, |N_i > 1\}, \forall j \in \mathcal{J}$$

$$s_{ij}, t_i, e_i, g_{ij} \geq 0 \quad \forall i \in \mathcal{I}, j \in \mathcal{J}$$

$$y_{ijkl} \in \{0, 1\} \quad \forall i \in \mathcal{I}, j \in \mathcal{J}, k \in \mathcal{I}, l \in \mathcal{J}$$

Modèle mathématique

$$\sum_{i \in \mathcal{I}} \sum_{j=1}^{N_i} \sum_{k \in \mathcal{I}, k \neq i} \sum_{l=1}^{N_k} y_{ijkl} = \sum_{i \in \mathcal{I}} N_i - 1$$



Nombre total
d'opérations

Définition du nombre total de prédécesseurs

Modèle mathématique

$$\min z_{\text{inventory}} = \sum_{i \in \mathcal{I}} Q_i (e_i + t_i - T)$$

$$\min z_{\text{setup}} = \sum_{i,j,k>i,l} Y_{ijkl} y_{ijkl}$$

$$\text{s.t. } s_{ij} + P_{ij} + t_{i,j} \leq s_{i,j+1} \quad \forall i \in \mathcal{I}, j \in \{1, \dots, N_i - 1\}$$

$$e_i = D_i - s_{i,N_i} - P_{i,N_i} \quad \forall i \in \mathcal{I}$$

$$s_{ij} + P_{ij} + g_{ij} + M(1 - y_{ijkl}) \geq s_{kl} \quad \forall (i, k) \in \{\mathcal{I}^2 | k \neq i\}, j \in \{1, \dots, N_i\}, l \in \{1, \dots, N_k\}$$

$$s_{ij} + P_{ij} + g_{ij} \leq M(1 - y_{ijkl}) + s_{kl} \quad \forall (i, k) \in \{\mathcal{I}^2 | k \neq i\}, j \in \{1, \dots, N_i\}, l \in \{1, \dots, N_k\}$$

$$\sum_{i \in \mathcal{I}} \sum_{j=1}^{N_i} \sum_{k \in \mathcal{I}, k \neq i} \sum_{l=1}^{N_k} y_{ijkl} = \sum_{i \in \mathcal{I}} N_i - 1$$

$$\sum_{i \in \mathcal{I}} \sum_{j=1}^{N_i} g_{ij} + \sum_{i \in \mathcal{I}} \sum_{j=1}^{N_i} P_{ij} = M$$

$$\sum_{k \in \mathcal{I}} \sum_{l=1}^{N_k} y_{ijkl} \leq 1 \quad \forall i \in \mathcal{I}, j \in \{1, \dots, N_i\}$$

$$\sum_{k \in \mathcal{I}} \sum_{l=1}^{N_k} y_{kl ij} \leq 1 \quad \forall i \in \mathcal{I}, j \in \{1, \dots, N_i\}$$

$$t_{ij} \geq T \quad \forall i \in \{\mathcal{I}, |N_i > 1\}, \forall j \in \mathcal{J}$$

$$s_{ij}, t_i, e_i, g_{ij} \geq 0 \quad \forall i \in \mathcal{I}, j \in \mathcal{J}$$

$$y_{ijkl} \in \{0, 1\} \quad \forall i \in \mathcal{I}, j \in \mathcal{J}, k \in \mathcal{I}, l \in \mathcal{J}$$

Modèle mathématique

$$\sum_{i \in \mathcal{I}} \sum_{j=1}^{N_i} g_{ij} + \sum_{i \in \mathcal{I}} \sum_{j=1}^{N_i} P_{ij} = M$$

Temps d'attente

Temps opératoire

Planification sur l'ensemble de l'horizon temporel

$$M = \max_{i \in \mathcal{I}} D_i$$

Modèle mathématique

$$\min z_{\text{inventory}} = \sum_{i \in \mathcal{I}} Q_i (e_i + t_i - T)$$

$$\min z_{\text{setup}} = \sum_{i,j,k>i,l} Y_{ijkl} y_{ijkl}$$

$$\text{s.t. } s_{ij} + P_{ij} + t_{i,j} \leq s_{i,j+1} \quad \forall i \in \mathcal{I}, j \in \{1, \dots, N_i - 1\}$$

$$e_i = D_i - s_{i,N_i} - P_{i,N_i} \quad \forall i \in \mathcal{I}$$

$$s_{ij} + P_{ij} + g_{ij} + M(1 - y_{ijkl}) \geq s_{kl} \quad \forall (i, k) \in \{\mathcal{I}^2 | k \neq i\}, j \in \{1, \dots, N_i\}, l \in \{1, \dots, N_k\}$$

$$s_{ij} + P_{ij} + g_{ij} \leq M(1 - y_{ijkl}) + s_{kl} \quad \forall (i, k) \in \{\mathcal{I}^2 | k \neq i\}, j \in \{1, \dots, N_i\}, l \in \{1, \dots, N_k\}$$

$$\sum_{i \in \mathcal{I}} \sum_{j=1}^{N_i} \sum_{k \in \mathcal{I}, k \neq i} \sum_{l=1}^{N_k} y_{ijkl} = \sum_{i \in \mathcal{I}} N_i - 1$$

$$\sum_{i \in \mathcal{I}} \sum_{j=1}^{N_i} g_{ij} + \sum_{i \in \mathcal{I}} \sum_{j=1}^{N_i} P_{ij} = M$$

$$\sum_{k \in \mathcal{I}} \sum_{l=1}^{N_k} y_{ijkl} \leq 1 \quad \forall i \in \mathcal{I}, j \in \{1, \dots, N_i\}$$

$$\sum_{k \in \mathcal{I}} \sum_{l=1}^{N_k} y_{kl ij} \leq 1 \quad \forall i \in \mathcal{I}, j \in \{1, \dots, N_i\}$$

$$t_{ij} \geq T \quad \forall i \in \{\mathcal{I}, |N_i > 1\}, \forall j \in \mathcal{J}$$

$$s_{ij}, t_i, e_i, g_{ij} \geq 0 \quad \forall i \in \mathcal{I}, j \in \mathcal{J}$$

$$y_{ijkl} \in \{0, 1\} \quad \forall i \in \mathcal{I}, j \in \mathcal{J}, k \in \mathcal{I}, l \in \mathcal{J}$$

Modèle mathématique

$$\sum_{k \in \mathcal{I}} \sum_{l=1}^{N_k} y_{ijkl} \leq 1, \forall i \in \mathcal{I}, j \in \{1, \dots, N_i\}$$

$$\sum_{k \in \mathcal{I}} \sum_{l=1}^{N_k} y_{klij} \leq 1, \forall i \in \mathcal{I}, j \in \{1, \dots, N_i\}$$

Un successeur au maximum

Stricte succession des opérations

Modèle mathématique

$$\min z_{\text{inventory}} = \sum_{i \in \mathcal{I}} Q_i (e_i + t_i - T)$$

$$\min z_{\text{setup}} = \sum_{i,j,k>i,l} Y_{ijkl} y_{ijkl}$$

$$\text{s.t. } s_{ij} + P_{ij} + t_{i,j} \leq s_{i,j+1} \quad \forall i \in \mathcal{I}, j \in \{1, \dots, N_i - 1\}$$

$$e_i = D_i - s_{i,N_i} - P_{i,N_i} \quad \forall i \in \mathcal{I}$$

$$s_{ij} + P_{ij} + g_{ij} + M(1 - y_{ijkl}) \geq s_{kl} \quad \forall (i, k) \in \{\mathcal{I}^2 | k \neq i\}, j \in \{1, \dots, N_i\}, l \in \{1, \dots, N_k\}$$

$$s_{ij} + P_{ij} + g_{ij} \leq M(1 - y_{ijkl}) + s_{kl} \quad \forall (i, k) \in \{\mathcal{I}^2 | k \neq i\}, j \in \{1, \dots, N_i\}, l \in \{1, \dots, N_k\}$$

$$\sum_{i \in \mathcal{I}} \sum_{j=1}^{N_i} \sum_{k \in \mathcal{I}, k \neq i} \sum_{l=1}^{N_k} y_{ijkl} = \sum_{i \in \mathcal{I}} N_i - 1$$

$$\sum_{i \in \mathcal{I}} \sum_{j=1}^{N_i} g_{ij} + \sum_{i \in \mathcal{I}} \sum_{j=1}^{N_i} P_{ij} = M$$

$$\sum_{k \in \mathcal{I}} \sum_{l=1}^{N_k} y_{ijkl} \leq 1 \quad \forall i \in \mathcal{I}, j \in \{1, \dots, N_i\}$$

$$\sum_{k \in \mathcal{I}} \sum_{l=1}^{N_k} y_{kl ij} \leq 1 \quad \forall i \in \mathcal{I}, j \in \{1, \dots, N_i\}$$

$$t_{ij} \geq T \quad \forall i \in \{\mathcal{I}, |N_i > 1\}, \forall j \in \mathcal{J}$$

$$s_{ij}, t_i, e_i, g_{ij} \geq 0 \quad \forall i \in \mathcal{I}, j \in \mathcal{J}$$

$$y_{ijkl} \in \{0, 1\} \quad \forall i \in \mathcal{I}, j \in \mathcal{J}, k \in \mathcal{I}, l \in \mathcal{J}$$

Modèle mathématique

$$t_{ij} \geq T, \forall i \in \{\mathcal{I} | N_i > 1\}, \forall j \in \mathcal{J}$$

Temps de séchage minimum

$$s_{ij}, t_{ij}, e_i, g_{ij} \geq 0 \forall i \in \mathcal{I}, j \in \mathcal{J}$$

Positivité

$$y_{ijkl} \in \{0, 1\}, \forall i \in \mathcal{I}, j \in \mathcal{J}, k \in \mathcal{I}, l \in \mathcal{J}$$

Binarité de y

EXPÉRIMENTATIONS NUMÉRIQUES ET RÉSULTATS

- Utilisation d'un générateur d'instances

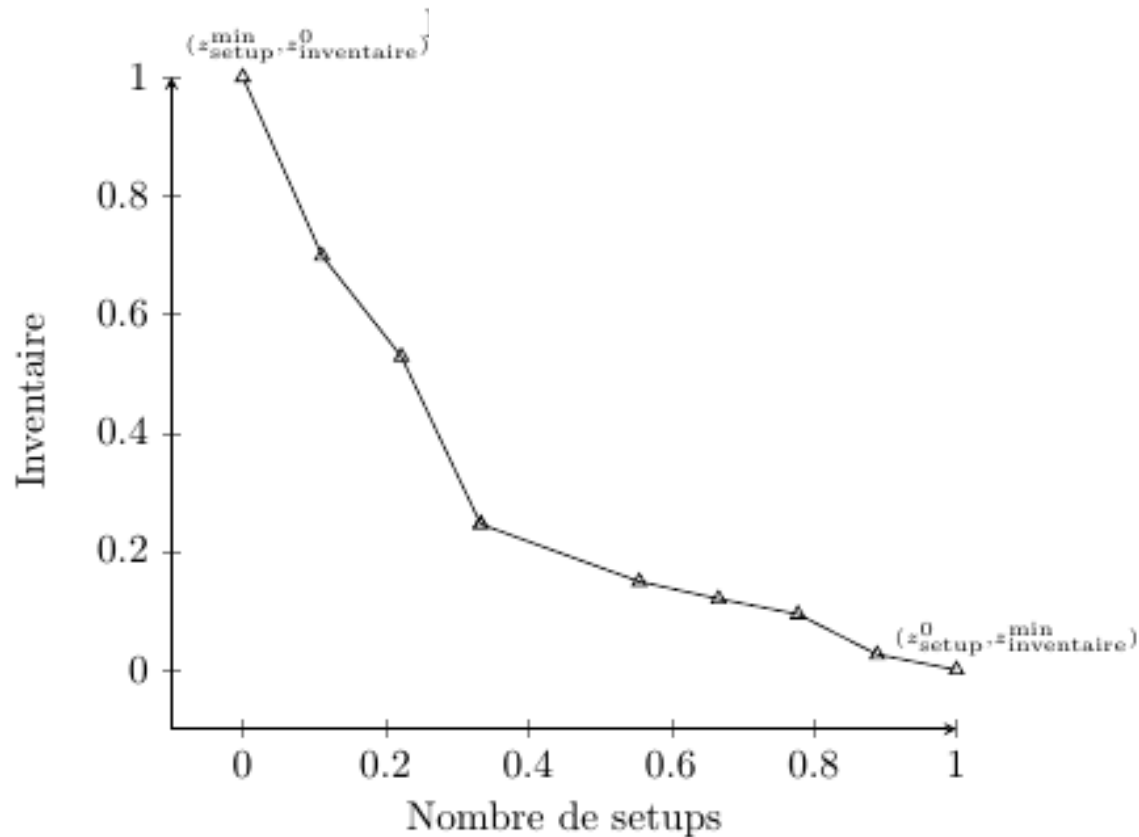
- Nombre de jobs $n = 10$
- Nombre maximum d'opérations par job $m = 2$
- Nombre de types d'opérations $|J| = 2$

Six configurations différentes – 20 instances par configuration

| T | Distribution du nombre d'opérations |
|----|-------------------------------------|
| 4 | 80% - 20% |
| 40 | 50% - 50% |
| | 20% - 80% |

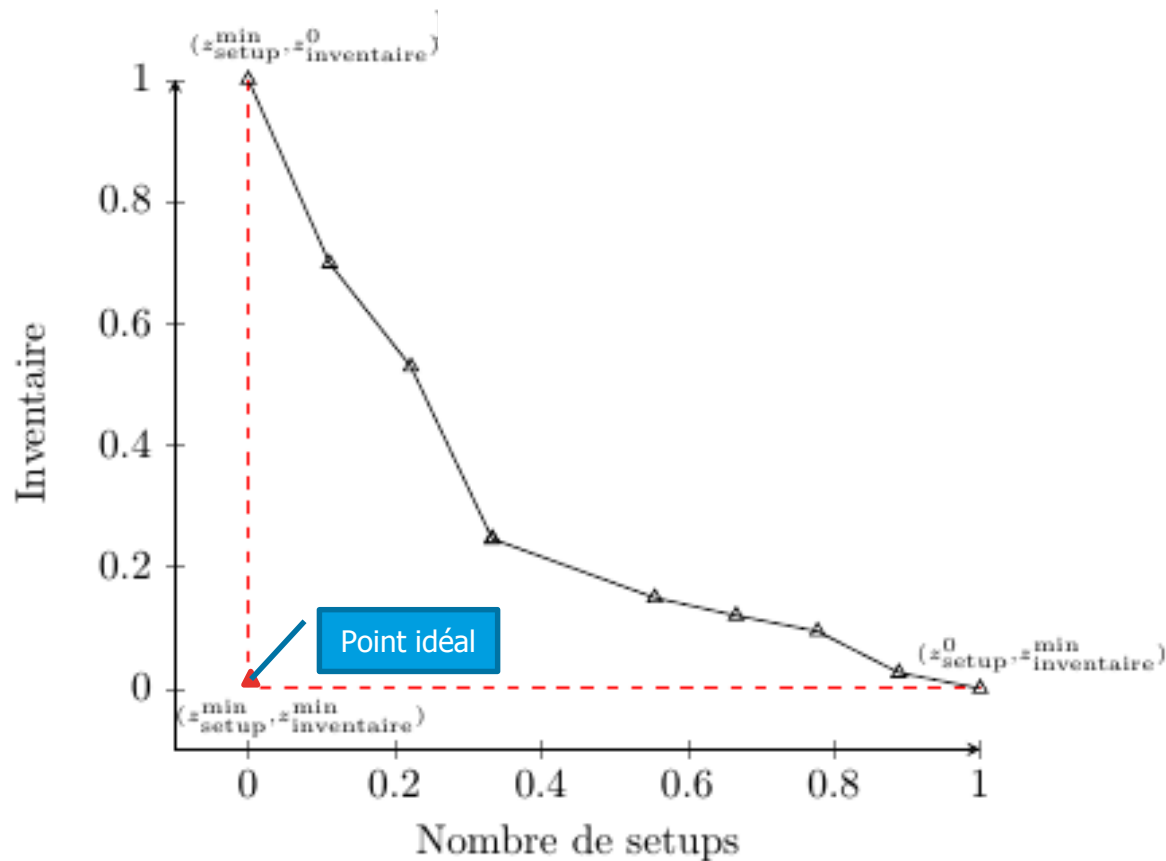
Expérimentations numériques et résultats

- Détermination d'un front de Pareto via la méthode ε -contrainte



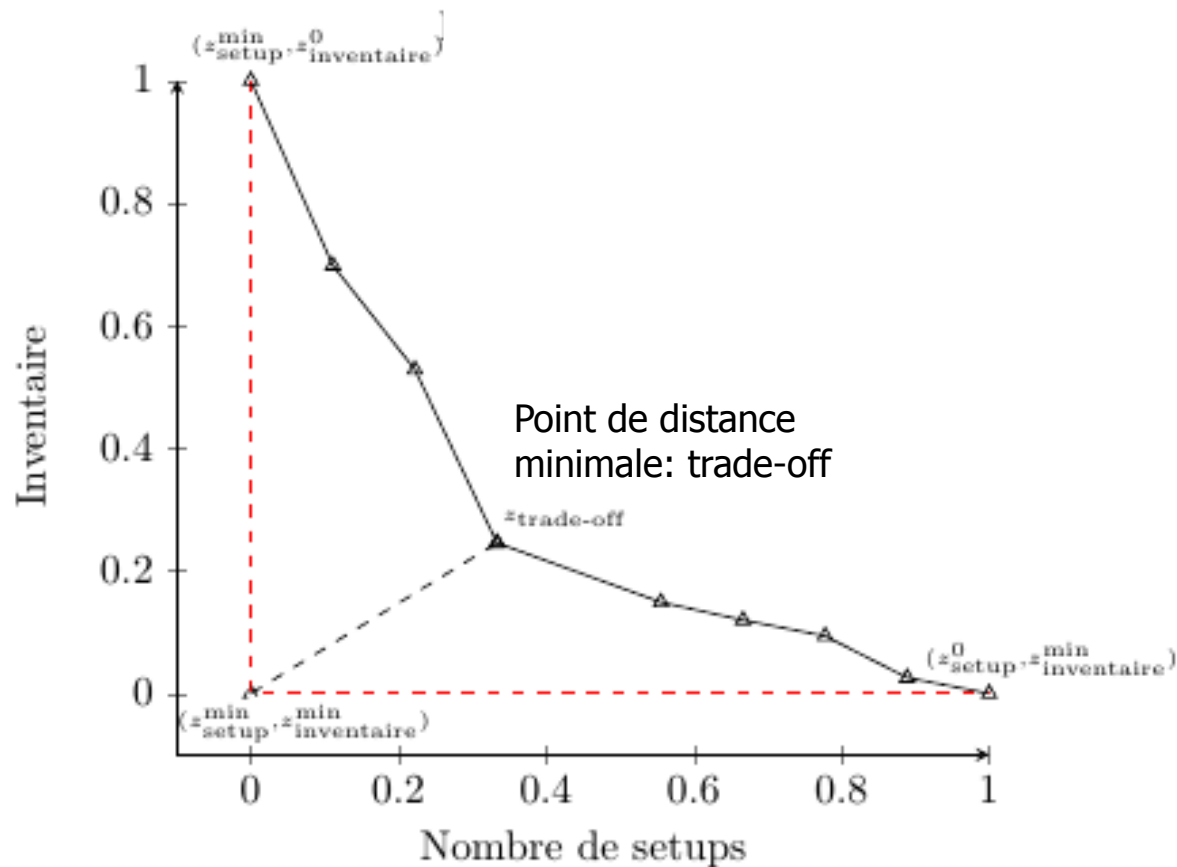
Expérimentations numériques et résultats

- Détermination du point idéal



Expérimentations numériques et résultats

- Détermination du point de trade-off: distance euclidienne



Expérimentations numériques et résultats

Résultats moyennés pour $T = 4$

| Configuration | Type de point | Nombre setups | Inventaire | Distance point idéal | Inventaire normalisé | Setups normalisé | Temps CPU (ms) |
|---------------|----------------|---------------|------------|----------------------|----------------------|------------------|----------------|
| 80-20 | Min inventaire | 5,05 | 3144,75 | 1,00 | 1,00 | 0,00 | 752,55 |
| | Trade-off | 3,40 | 4401,95 | 0,64 | 0,53 | 0,23 | 1255,35 |
| | Min Setup | 2,05 | 7839,90 | 1,00 | 0,00 | 1,00 | 5776,40 |
| 50-50 | Min inventaire | 7,05 | 4211,95 | 1,00 | 1,00 | 0,00 | 27715,10 |
| | Trade-off | 4,35 | 5787,40 | 0,53 | 0,44 | 0,21 | 67277,05 |
| | Min Setup | 2,60 | 10003,55 | 1,00 | 0,00 | 1,00 | 142267,25 |
| 20-80 | Min inventaire | 8,85 | 6266,26 | 1,00 | 1,00 | 0,00 | 451780,60 |
| | Trade-off | 4,75 | 8412,30 | 0,48 | 0,36 | 0,27 | 474035,40 |
| | Min Setup | 3,00 | 15841,10 | 1,00 | 0,00 | 1,00 | 1253308,20 |

Expérimentations numériques et résultats

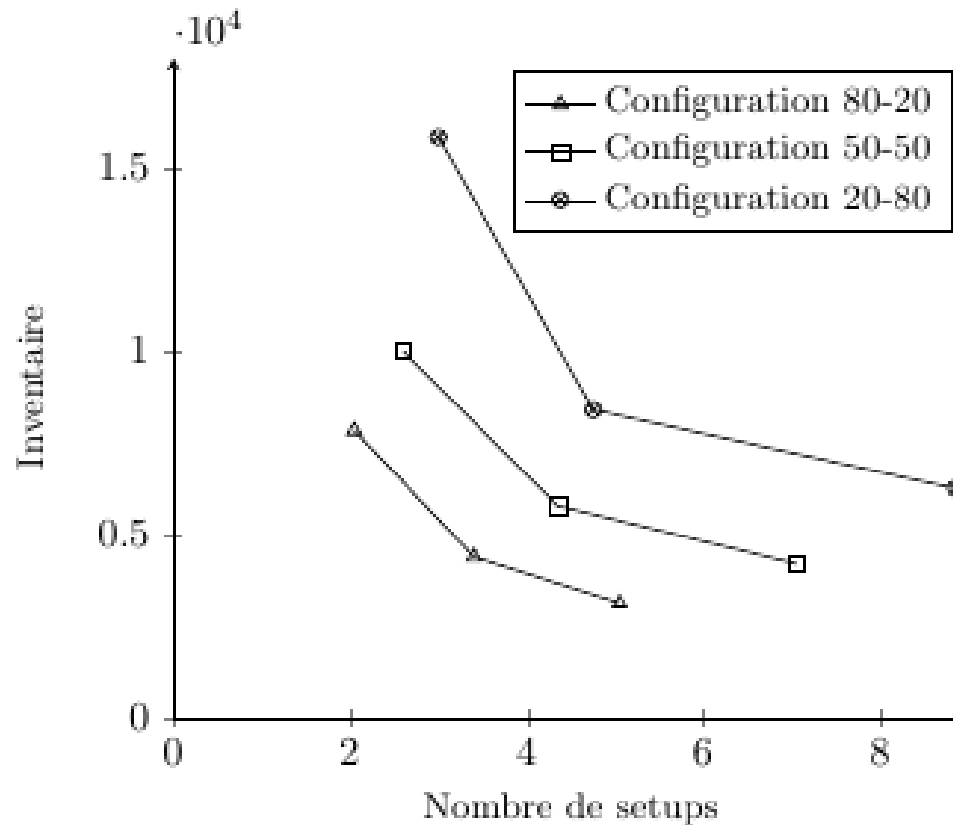
Résultats moyennés pour $T = 4$

Configuration 50% - 50%

| Configuration | Type de point | Nombre setups | Inventaire | Distance point idéal | Inventaire normalisé | Setups normalisé | Temps CPU (ms) |
|---------------|----------------|---------------|------------|----------------------|----------------------|------------------|----------------|
| 50-50 | Min inventaire | 7,05 | 4211,95 | 1,00 | 1,00 | 0,00 | 27715,10 |
| | Trade-off | 4,35 | 5787,40 | 0,53 | 0,44 | 0,21 | 67277,05 |
| | Min Setup | 2,60 | 10003,55 | 1,00 | 0,00 | 1,00 | 142267,25 |

Ecart-type important pour le temps CPU

Expérimentations numériques et résultats



Points de trade-off, inventaire minimum et setups minimum pour $T=4$

CONCLUSION ET PERSPECTIVES

Conclusion et perspectives

- **Positionnement:**
 - Programmation Linéaire Mixte pour un problème machine unique avec réentrance
 - Optimisation bi-objectif : déchets de setup et inventaire
 - Obtention de solutions alternatives viables pour l'aide à la décision
- **Perspectives:**
 - Expérimentations sur des instances de grande taille
 - Nouvelles configurations inspirées du monde industriel
 - Extension à un environnement multi-machines
 - Evaluation des coûts des déchets et d'inventaire pour une meilleure estimation de l'impact économique

Méthodes
approchées

- Adonyi, R., Biros, G., Holczinger, T., and Friedler, F. (2008). Effective scheduling of a large-scale paint production system. *Journal of Cleaner Production*, 16(2), 225-232.
- Blazewicz, J. (2010). Scheduling of coupled tasks with unit processing times. *Journal of Scheduling*, 13(5), 453-461.
- Blazewicz, J., Pawlak, G., Tanas, M., and Wojciechowicz, W. (2012). New algorithms for coupled tasks scheduling a survey. *RAIRO - Operations Research*, 46(4), 335-353.
- Chen, J.S. and Chao-Hsien Pan, J. (2006). Integer programming models for the re-entrant shop scheduling problems. *Engineering Optimization*, 38(5), 577-592.
- Condotta, A. and Shakhlevich, N.V. (2012). Scheduling coupled-operation jobs with exact time-lags. *Discrete Applied Mathematics*, 160(16-17), 2370-2388.
- Giret, A., Trentesaux, D., and Prabhu, V. (2015). Sustainability in manufacturing operations scheduling: A state of the art review. *Journal of Manufacturing Systems*, 37, 126-140.
- Grau, R., Espuna, A., and Puigjaner, L. (1994). Focusing in by-product recovery and waste minimization in batch production scheduling. *Computers and Chemical Engineering*, 18(SUPPL), 271-275.
- Gupta, J.N.D. (1996). Comparative evaluation of heuristic algorithms for the single machine scheduling problem with two operations per job and time-lags. *Journal of Global Optimization*, 9(3), 239-253.
- Manne, A.S. (1960). On the Job-Shop Scheduling Problem. *Operations Research*, 8(2), 219-223.
- Orman, A.J. and Potts, C.N. (1997). On the complexity of coupled-task scheduling. *Discrete Applied Mathematics*, 72(96), 141-154.
- Winter, E. and Baptiste, P. (2007). On scheduling a multifunction radar. *Aerospace Science and Technology*, 11(4), 289-294.

Réduire les déchets de production : ordonnancement bi-objectif sur une machine unique avec réentrance



Session GT Bermudes, 9/10/2017

Corentin Le Hesran, doctorant 2^e année, INSA Lyon, DISP

Encadrants: Valérie Botta-Genoulaz, Université de Lyon, INSA Lyon, DISP

Valérie Laforest, Université de Lyon, EMSE, EVS

Anne-Laure Ladier, Université de Lyon, INSA Lyon, DISP

Thèse doctorale soutenue financièrement par



UNIVERSITÉ
LUMIÈRE
LYON 2



Expérimentations numériques et résultats

- Détermination d'un front de Pareto via la méthode ε -contrainte

Algorithm 1 Pareto front generation

1. Compute the $(z_{\text{inventory}}^{\min}, z_{\text{setup}}^0)$ point by solving the model with the following objective function: $z_{\text{weighted}} = \alpha \times z_{\text{inventory}} + \beta \times z_{\text{setup}}$

2. Set $\varepsilon = z_{\text{setup}}^0 - 1$

3.

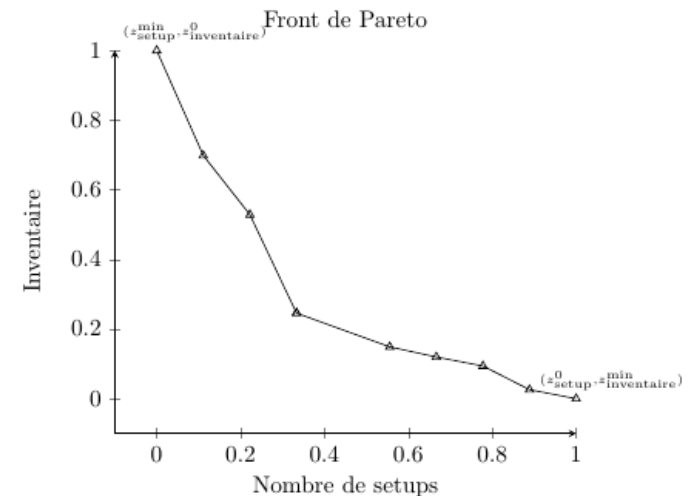
while problem is feasible **do**

i. Solve the ε -constraint problem with $z_{\text{setup}} \leq \varepsilon$ as a constraint and $z_{\text{inventory}}$ as the objective function. Add the objective function value $(z_{\text{inventory}}^{\text{it}}, z_{\text{setup}}^{\text{it}})$ to the set of Pareto front points

ii. Set $\varepsilon = z_{\text{setup}}^{\text{it}} - 1$

iii. $\text{it} = \text{it} + 1$

end while



$$\text{minimize } C_{\max} \quad (13)$$

$$\text{subject to } \sum_{k=1}^m r_{ijk}(s_{ij} + p_{ij}) \leq \sum_{k=1}^m r_{i,j+1,k} s_{i,j+1} \quad i = 1, 2, \dots, n, \quad j = 1, 2, \dots, N_i - 1$$

$$M(2 - r_{ijk} - r_{i'j'k}) + M(1 - Z_{ijj'}) + (s_{i'j'} - s_{ij}) \geq p_{ij} \quad 1 \leq i < i' \leq n, \\ j = 1, 2, \dots, N_i; \quad j' = 1, 2, \dots, N_i; \quad k = 1, 2, \dots, m$$

$$M(2 - r_{ijk} - r_{i'j'k}) + MZ_{ijj'} + (s_{ij} - s_{i'j'}) \geq p_{i'j'} \quad 1 \leq i < i' \leq n, \\ j = 1, 2, \dots, N_i; \quad j' = 1, 2, \dots, N_{i'}, \quad k = 1, 2, \dots, m$$

$$\sum_{k=1}^m r_{i,N_i,k}(s_{i,N_i} + p_{i,N_i}) \leq C_{\max}, \quad i = 1, 2, \dots, n$$

$$C_{\max} \geq 0, \quad s_{ij} \geq 0, \quad i = 1, 2, \dots, n, \quad j = 1, 2, \dots, N_i,$$

$$Z_{ijj'} = 0 \text{ or } 1, \quad 1 \leq i < i' \leq n, \quad j = 1, 2, \dots, N_i$$

$$j' = 1, 2, \dots, N_{i'}, \quad k = 1, 2, \dots, m.$$

