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

Laboratoire
Décision et Information
Pour les Systèmes de Production

Session GT Bermudes, 9/10/2017

Corentin Le Hesran, doctorant 2e 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

La Région Auvergne-Rhône-Alpes

INSA INSTITUT NATIONAL DES SCIENCES APPLIQUÉES LYON

Université Claude Bernard Lyon 1

UNIVERSITÉ LUMIÈRE LYON 2

EVS

UNIVERSITÉ DE LYON

Plan

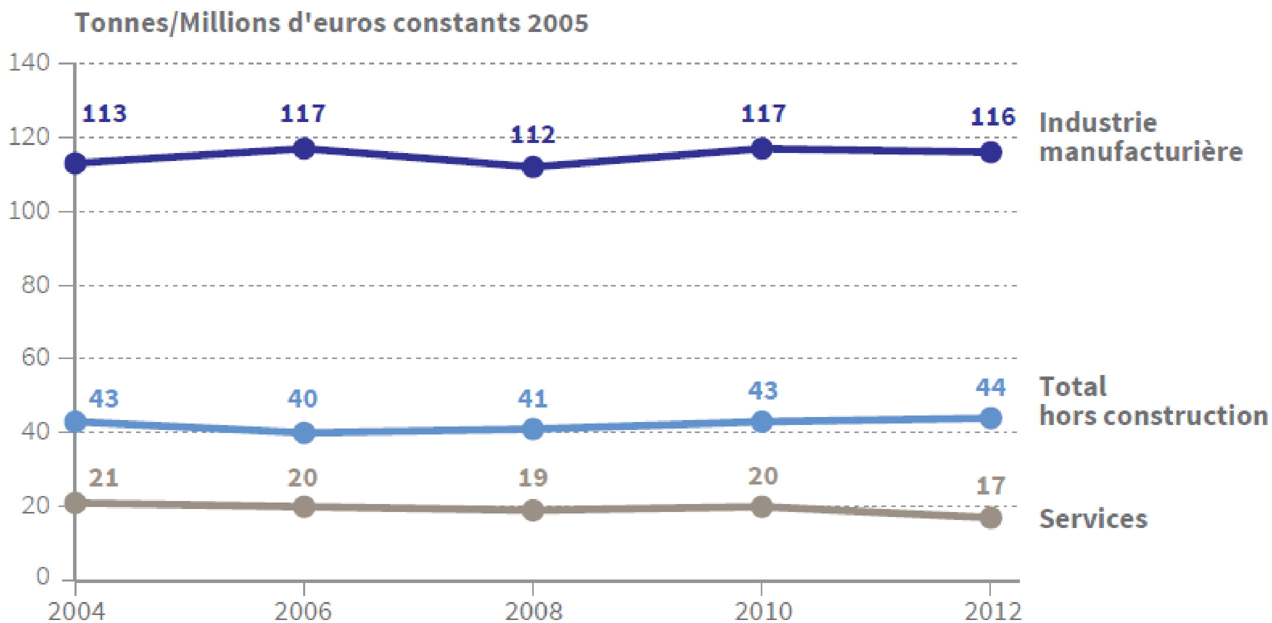
- Contexte
- Tâches couplées: positionnement
- Modèle mathématique
- Expérimentations numériques et résultats
- Conclusion et perspectives

CONTEXTE

Les déchets en France

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

Production durable et ordonnancement

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	Adonyi et al (2008) Effective scheduling of a large-scale paint production system	Industrie Chimique
Inclusion des coûts environnementaux Utilisation d'un index de pollution	Optimisation bi-objectif Ordonnancements alternatifs Utilisation de S-Graph	

TACHES COUPLÉES: POSITIONNEMENT

Laboratoire
Décision et Information
Pour les Systèmes de Production

Cas d'étude

Taches couplées: positionnement

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

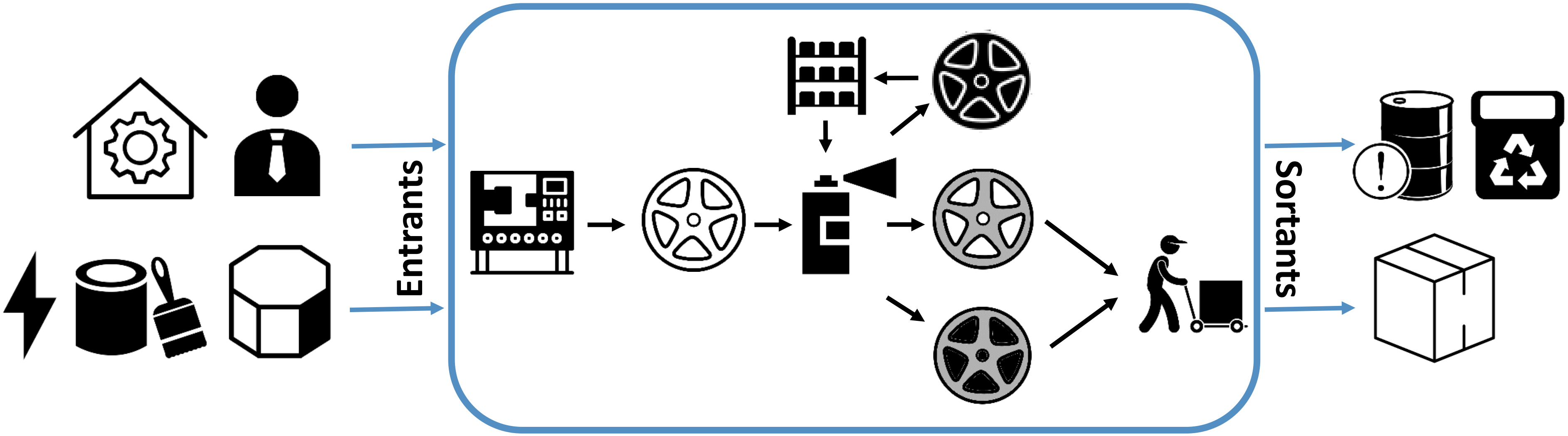


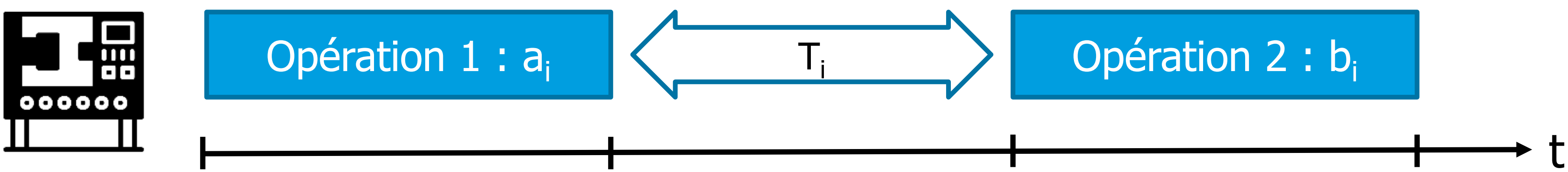
Schéma du fonctionnement d'une ligne de peinture

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) | -

Ordonnancement avec tâches couplées

Taches couplées: positionnement

Problèmes d'ordonnancement avec tâches couplées

⇩ ⇩ ⇩

Complexité du problème Gupta (1996) Orman and Potts (1997)	**Méthodes de résolution** Blazewicz et al (2012) Condotta et al (2012)	**Autres travaux** Winter et al (2007) Blazewicz (2010)
Problème NP-Difficile	Prédominance des heuristiques Minimisation du makespan	Minimisation des délais Ordonnancement avec sequence dependence
Temps de calcul important	Programmation Linéaire à Variables Mixtes Due Dates	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

Données et variables de décision

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

Fonctions objectif

Modèle mathématique

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

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

$$\begin{array}{lll}
\text{s.t.} & s_{ij} + P_{ij} + t_{i,j} \leq s_{i,j+1} & \forall i \in \mathcal{I}, j \in \{1,\ldots,N_i - 1\} \\
& e_i = D_i - s_{i,N_i} - P_{i,N_i} & \forall i \in \mathcal{I} \\
& s_{ij} + P_{ij} + g_{ij} + M(1 - y_{ijkl}) \geq s_{kl} & \forall (i,k) \in \{\mathcal{I}^2 | k \neq i\}, j \in \{1,\ldots,N_i\}, l \in \{1,\ldots,N_k\} \\
& s_{ij} + P_{ij} + g_{ij} \leq M(1 - y_{ijkl}) + s_{kl} & \forall (i,k) \in \{\mathcal{I}^2 | k \neq i\}, j \in \{1,\ldots,N_i\}, l \in \{1,\ldots,N_k\} \\
& \displaystyle\sum_{i\in\mathcal{I}} \sum_{j=1}^{N_i} \sum_{k\in\mathcal{I}, k\neq i} \sum_{l=1}^{N_k} y_{ijkl} = \sum_{i\in\mathcal{I}} N_i - 1 & \\
& \displaystyle\sum_{i\in\mathcal{I}} \sum_{j=1}^{N_i} g_{ij} + \sum_{i\in\mathcal{I}} \sum_{j=1}^{N_i} P_{ij} = M & \\
& \displaystyle\sum_{k\in\mathcal{I}} \sum_{l=1}^{N_k} y_{ijkl} \leq 1 & \forall i \in \mathcal{I}, j \in \{1,\ldots,N_i\} \\
& \displaystyle\sum_{k\in\mathcal{I}} \sum_{l=1}^{N_k} y_{klij} \leq 1 & \forall i \in \mathcal{I}, j \in \{1,\ldots,N_i\} \\
& t_{ij} \geq T & \forall i \in \{\mathcal{I}, |N_i > 1\}, \forall j \in \mathcal{J} \\
& s_{ij}, t_i, e_i, g_{ij} \geq 0 & \forall i \in \mathcal{I}, j \in \mathcal{J} \\
& y_{ijkl} \in \{0,1\} & \forall i \in \mathcal{I}, j \in \mathcal{J}, k \in \mathcal{I}, l \in \mathcal{J}
\end{array}$$

Fonctions objectif

Modèle mathématique

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

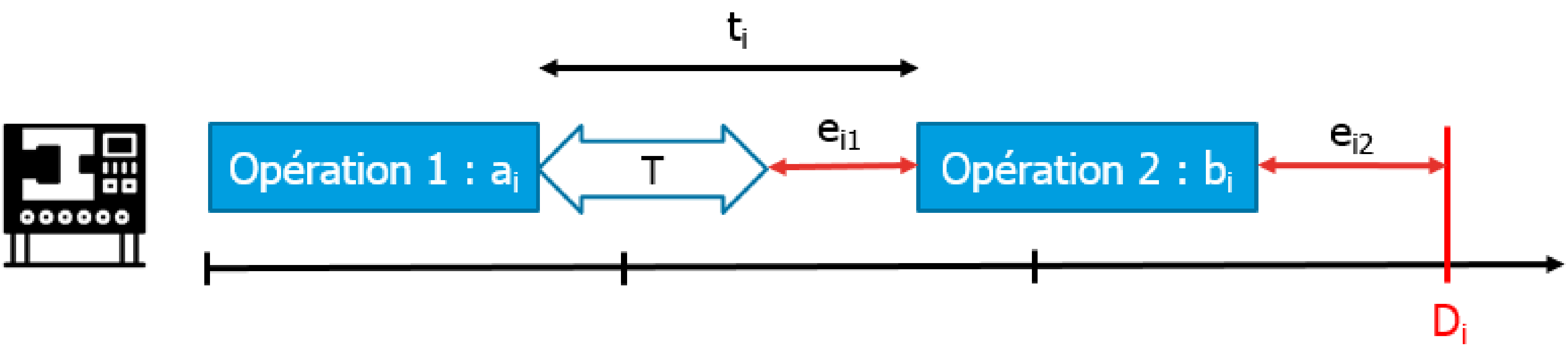
$$\min \; z_{\text{setup}} = \sum_{i,j,k>i,l} Y_{ijkl} \; y_{ijkl}$$

$$
\begin{array}{lll}
\text{s.t.} & s_{ij} + P_{ij} + t_{i,j} \leq s_{i,j+1} & \forall i \in \mathcal{I}, j \in \{1, \ldots, N_i - 1\} \\
& e_i = D_i - s_{i,N_i} - P_{i,N_i} & \forall i \in \mathcal{I} \\
& s_{ij} + P_{ij} + g_{ij} + M(1 - y_{ijkl}) \geq s_{kl} & \forall (i,k) \in \{\mathcal{I}^2 | k \neq i\}, j \in \{1, \ldots, N_i\}, l \in \{1, \ldots, N_k\} \\
& s_{ij} + P_{ij} + g_{ij} \leq M(1 - y_{ijkl}) + s_{kl} & \forall (i,k) \in \{\mathcal{I}^2 | k \neq i\}, j \in \{1, \ldots, N_i\}, l \in \{1, \ldots, N_k\} \\
& \displaystyle\sum_{i \in \mathcal{I}} \sum_{j=1}^{N_i} \sum_{k \in \mathcal{I}, k \neq i} \sum_{l=1}^{N_k} y_{ijkl} = \sum_{i \in \mathcal{I}} N_i - 1 & \\
& \displaystyle\sum_{i \in \mathcal{I}} \sum_{j=1}^{N_i} g_{ij} + \sum_{i \in \mathcal{I}} \sum_{j=1}^{N_i} P_{ij} = M & \\
& \displaystyle\sum_{k \in \mathcal{I}} \sum_{l=1}^{N_k} y_{ijkl} \leq 1 & \forall i \in \mathcal{I}, j \in \{1, \ldots, N_i\} \\
& \displaystyle\sum_{k \in \mathcal{I}} \sum_{l=1}^{N_k} y_{klij} \leq 1 & \forall i \in \mathcal{I}, j \in \{1, \ldots, N_i\} \\
& t_{ij} \geq T & \forall i \in \{\mathcal{I}, | N_i > 1\}, \forall j \in \mathcal{J} \\
& s_{ij}, t_i, e_i, g_{ij} \geq 0 & \forall i \in \mathcal{I}, j \in \mathcal{J} \\
& y_{ijkl} \in \{0, 1\} & \forall i \in \mathcal{I}, j \in \mathcal{J}, k \in \mathcal{I}, l \in \mathcal{J}
\end{array}
$$

Fonctions objectif

Modèle mathématique

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



$e_{i1} + e_{i2}$

Fonctions objectif

Modèle mathématique

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

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

$$
\begin{array}{lll}
\text{s.t.} & s_{ij} + P_{ij} + t_{i,j} \leq s_{i,j+1} & \forall i \in \mathcal{I}, j \in \{1, \ldots, N_i - 1\} \\
& e_i = D_i - s_{i,N_i} - P_{i,N_i} & \forall i \in \mathcal{I} \\
& s_{ij} + P_{ij} + g_{ij} + M(1 - y_{ijkl}) \geq s_{kl} & \forall (i,k) \in \{\mathcal{I}^2 | k \neq i\}, j \in \{1, \ldots, N_i\}, l \in \{1, \ldots, N_k\} \\
& s_{ij} + P_{ij} + g_{ij} \leq M(1 - y_{ijkl}) + s_{kl} & \forall (i,k) \in \{\mathcal{I}^2 | k \neq i\}, j \in \{1, \ldots, N_i\}, l \in \{1, \ldots, N_k\} \\
& \displaystyle\sum_{i \in \mathcal{I}} \sum_{j=1}^{N_i} \sum_{k \in \mathcal{I}, k \neq i} \sum_{l=1}^{N_k} y_{ijkl} = \sum_{i \in \mathcal{I}} N_i - 1 & \\
& \displaystyle\sum_{i \in \mathcal{I}} \sum_{j=1}^{N_i} g_{ij} + \sum_{i \in \mathcal{I}} \sum_{j=1}^{N_i} P_{ij} = M & \\
& \displaystyle\sum_{k \in \mathcal{I}} \sum_{l=1}^{N_k} y_{ijkl} \leq 1 & \forall i \in \mathcal{I}, j \in \{1, \ldots, N_i\} \\
& \displaystyle\sum_{k \in \mathcal{I}} \sum_{l=1}^{N_k} y_{klij} \leq 1 & \forall i \in \mathcal{I}, j \in \{1, \ldots, N_i\} \\
& t_{ij} \geq T & \forall i \in \{\mathcal{I}, |N_i > 1\}, \forall j \in \mathcal{J} \\
& s_{ij}, t_i, e_i, g_{ij} \geq 0 & \forall i \in \mathcal{I}, j \in \mathcal{J} \\
& y_{ijkl} \in \{0, 1\} & \forall i \in \mathcal{I}, j \in \mathcal{J}, k \in \mathcal{I}, l \in \mathcal{J}
\end{array}
$$

Fonctions objectif

Modèle mathématique

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

(k,l) \ (i,j)	**B**	**N**
B	0	1
N	1	0

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

Laboratoire
Décision et Information
Pour les Systèmes de Production

Contraintes

Modèle mathématique

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

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

$$\begin{array}{lll}
\text{s.t.} & s_{ij} + P_{ij} + t_{i,j} \leq s_{i,j+1} & \forall i \in \mathcal{I}, j \in \{1, \ldots, N_i - 1\} \\
 & e_i = D_i - s_{i,N_i} - P_{i,N_i} & \forall i \in \mathcal{I} \\
 & s_{ij} + P_{ij} + g_{ij} + M(1 - y_{ijkl}) \geq s_{kl} & \forall (i,k) \in \{\mathcal{I}^2 | k \neq i\}, j \in \{1, \ldots, N_i\}, l \in \{1, \ldots, N_k\} \\
 & s_{ij} + P_{ij} + g_{ij} \leq M(1 - y_{ijkl}) + s_{kl} & \forall (i,k) \in \{\mathcal{I}^2 | k \neq i\}, j \in \{1, \ldots, N_i\}, l \in \{1, \ldots, N_k\} \\
 & \displaystyle\sum_{i \in \mathcal{I}} \sum_{j=1}^{N_i} \sum_{k \in \mathcal{I}, k \neq i} \sum_{l=1}^{N_k} y_{ijkl} = \sum_{i \in \mathcal{I}} N_i - 1 & \\
 & \displaystyle\sum_{i \in \mathcal{I}} \sum_{j=1}^{N_i} g_{ij} + \sum_{i \in \mathcal{I}} \sum_{j=1}^{N_i} P_{ij} = M & \\
 & \displaystyle\sum_{k \in \mathcal{I}} \sum_{l=1}^{N_k} y_{ijkl} \leq 1 & \forall i \in \mathcal{I}, j \in \{1, \ldots, N_i\} \\
 & \displaystyle\sum_{k \in \mathcal{I}} \sum_{l=1}^{N_k} y_{klij} \leq 1 & \forall i \in \mathcal{I}, j \in \{1, \ldots, N_i\} \\
 & t_{ij} \geq T & \forall i \in \{\mathcal{I}, |N_i > 1\}, \forall j \in \mathcal{J} \\
 & s_{ij}, t_i, e_i, g_{ij} \geq 0 & \forall i \in \mathcal{I}, j \in \mathcal{J} \\
 & y_{ijkl} \in \{0, 1\} & \forall i \in \mathcal{I}, j \in \mathcal{J}, k \in \mathcal{I}, l \in \mathcal{J}
\end{array}$$

Contraintes

Modèle mathématique

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

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

Contraintes

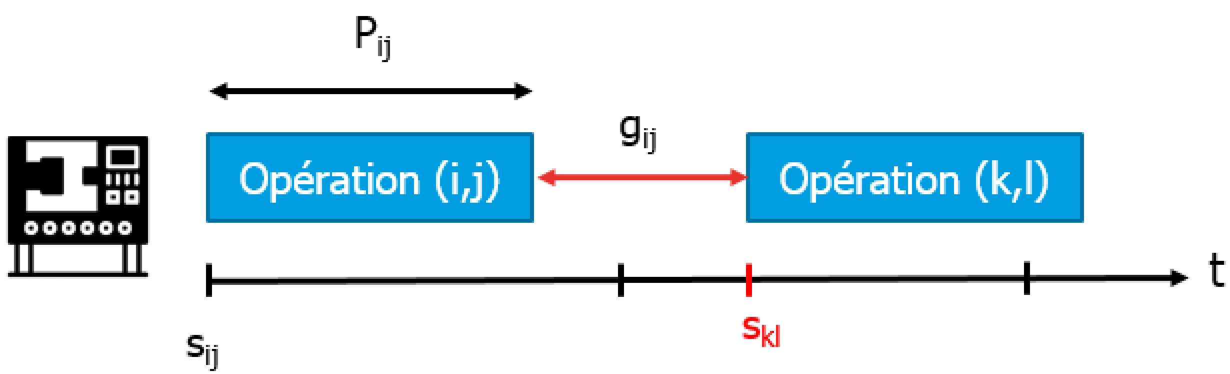
Modèle mathématique

$$
\begin{array}{lll}
\min & z_{\text{inventory}} = \sum_{i \in \mathcal{I}} Q_i(e_i + t_i - T) & \\
\min & z_{\text{setup}} = \sum_{i,j,k>i,l} Y_{ijkl}\ y_{ijkl} & \\
\text{s.t.} & s_{ij} + P_{ij} + t_{i,j} \leq s_{i,j+1} & \forall i \in \mathcal{I}, j \in \{1, \ldots, N_i - 1\} \\
& e_i = D_i - s_{i,N_i} - P_{i,N_i} & \forall i \in \mathcal{I} \\
& \boxed{s_{ij} + P_{ij} + g_{ij} + M(1 - y_{ijkl}) \geq s_{kl}} & \forall (i,k) \in \{\mathcal{I}^2 | k \neq i\}, j \in \{1, \ldots, N_i\}, l \in \{1, \ldots, N_k\} \\
& \boxed{s_{ij} + P_{ij} + g_{ij} \leq M(1 - y_{ijkl}) + s_{kl}} & \forall (i,k) \in \{\mathcal{I}^2 | k \neq i\}, j \in \{1, \ldots, N_i\}, l \in \{1, \ldots, N_k\} \\
& \sum_{i \in \mathcal{I}} \sum_{j=1}^{N_i} \sum_{k \in \mathcal{I}, k \neq i} \sum_{l=1}^{N_k} y_{ijkl} = \sum_{i \in \mathcal{I}} N_i - 1 & \\
& \sum_{i \in \mathcal{I}} \sum_{j=1}^{N_i} g_{ij} + \sum_{i \in \mathcal{I}} \sum_{j=1}^{N_i} P_{ij} = M & \\
& \sum_{k \in \mathcal{I}} \sum_{l=1}^{N_k} y_{ijkl} \leq 1 & \forall i \in \mathcal{I}, j \in \{1, \ldots, N_i\} \\
& \sum_{k \in \mathcal{I}} \sum_{l=1}^{N_k} y_{klij} \leq 1 & \forall i \in \mathcal{I}, j \in \{1, \ldots, N_i\} \\
& t_{ij} \geq T & \forall i \in \{\mathcal{I}, | N_i > 1\}, \forall j \in \mathcal{J} \\
& s_{ij}, t_i, e_i, g_{ij} \geq 0 & \forall i \in \mathcal{I}, j \in \mathcal{J} \\
& y_{ijkl} \in \{0, 1\} & \forall i \in \mathcal{I}, j \in \mathcal{J}, k \in \mathcal{I}, l \in \mathcal{J}
\end{array}
$$

Contraintes

Modèle mathématique

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



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

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

Existence d'un seul prédécesseur

Contraintes

Modèle mathématique

$$
\begin{array}{lll}
\min & z_{\text{inventory}} = \sum_{i \in \mathcal{I}} Q_i(e_i + t_i - T) & \\
\min & z_{\text{setup}} = \sum_{i,j,k>i,l} Y_{ijkl}\; y_{ijkl} & \\
\text{s.t.} & s_{ij} + P_{ij} + t_{i,j} \leq s_{i,j+1} & \forall i \in \mathcal{I}, j \in \{1, \ldots, N_i - 1\} \\
& e_i = D_i - s_{i,N_i} - P_{i,N_i} & \forall i \in \mathcal{I} \\
& s_{ij} + P_{ij} + g_{ij} + M(1 - y_{ijkl}) \geq s_{kl} & \forall (i,k) \in \{\mathcal{I}^2 | k \neq i\}, j \in \{1, \ldots, N_i\}, l \in \{1, \ldots, N_k\} \\
& s_{ij} + P_{ij} + g_{ij} \leq M(1 - y_{ijkl}) + s_{kl} & \forall (i,k) \in \{\mathcal{I}^2 | k \neq i\}, j \in \{1, \ldots, N_i\}, l \in \{1, \ldots, N_k\} \\
& \boxed{\sum_{i \in \mathcal{I}} \sum_{j=1}^{N_i} \sum_{k \in \mathcal{I}, k \neq i} \sum_{l=1}^{N_k} y_{ijkl} = \sum_{i \in \mathcal{I}} N_i - 1} & \\
& \sum_{i \in \mathcal{I}} \sum_{j=1}^{N_i} g_{ij} + \sum_{i \in \mathcal{I}} \sum_{j=1}^{N_i} P_{ij} = M & \\
& \sum_{k \in \mathcal{I}} \sum_{l=1}^{N_k} y_{ijkl} \leq 1 & \forall i \in \mathcal{I}, j \in \{1, \ldots, N_i\} \\
& \sum_{k \in \mathcal{I}} \sum_{l=1}^{N_k} y_{klij} \leq 1 & \forall i \in \mathcal{I}, j \in \{1, \ldots, N_i\} \\
& t_{ij} \geq T & \forall i \in \{\mathcal{I}, | N_i > 1\}, \forall j \in \mathcal{J} \\
& s_{ij}, t_i, e_i, g_{ij} \geq 0 & \forall i \in \mathcal{I}, j \in \mathcal{J} \\
& y_{ijkl} \in \{0, 1\} & \forall i \in \mathcal{I}, j \in \mathcal{J}, k \in \mathcal{I}, l \in \mathcal{J}
\end{array}
$$

Contraintes

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

Contraintes

Modèle mathématique

$$
\begin{array}{lll}
\min & z_{\text{inventory}} = \sum_{i\in\mathcal{I}} Q_i(e_i + t_i - T) & \\
\min & z_{\text{setup}} = \sum_{i,j,k>i,l} Y_{ijkl}\ y_{ijkl} & \\
\text{s.t.} & s_{ij} + P_{ij} + t_{i,j} \le s_{i,j+1} & \forall i \in \mathcal{I}, j \in \{1,\dots,N_i - 1\} \\
& e_i = D_i - s_{i,N_i} - P_{i,N_i} & \forall i \in \mathcal{I} \\
& s_{ij} + P_{ij} + g_{ij} + M(1 - y_{ijkl}) \ge s_{kl} & \forall (i,k) \in \{\mathcal{I}^2 | k \ne i\}, j \in \{1,\dots,N_i\}, l \in \{1,\dots,N_k\} \\
& s_{ij} + P_{ij} + g_{ij} \le M(1 - y_{ijkl}) + s_{kl} & \forall (i,k) \in \{\mathcal{I}^2 | k \ne i\}, j \in \{1,\dots,N_i\}, l \in \{1,\dots,N_k\} \\
& \sum_{i\in\mathcal{I}} \sum_{j=1}^{N_i} \sum_{k\in\mathcal{I}, k\ne i} \sum_{l=1}^{N_k} y_{ijkl} = \sum_{i\in\mathcal{I}} N_i - 1 & \\
& \boxed{\sum_{i\in\mathcal{I}} \sum_{j=1}^{N_i} g_{ij} + \sum_{i\in\mathcal{I}} \sum_{j=1}^{N_i} P_{ij} = M} & \\
& \sum_{k\in\mathcal{I}} \sum_{l=1}^{N_k} y_{ijkl} \le 1 & \forall i \in \mathcal{I}, j \in \{1,\dots,N_i\} \\
& \sum_{k\in\mathcal{I}} \sum_{l=1}^{N_k} y_{klij} \le 1 & \forall i \in \mathcal{I}, j \in \{1,\dots,N_i\} \\
& t_{ij} \ge T & \forall i \in \{\mathcal{I}, |N_i > 1\}, \forall j \in \mathcal{J} \\
& s_{ij}, t_i, e_i, g_{ij} \ge 0 & \forall i \in \mathcal{I}, j \in \mathcal{J} \\
& y_{ijkl} \in \{0,1\} & \forall i \in \mathcal{I}, j \in \mathcal{J}, k \in \mathcal{I}, l \in \mathcal{J}
\end{array}
$$

Laboratoire Décision et Information Pour les Systèmes de Production

Contraintes

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

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

Contraintes

Modèle mathématique

$$
\begin{array}{lll}
\min & z_{\text{inventory}} = \sum_{i \in \mathcal{I}} Q_i(e_i + t_i - T) & \\
\min & z_{\text{setup}} = \sum_{i,j,k>i,l} Y_{ijkl}\; y_{ijkl} & \\
\text{s.t.} & s_{ij} + P_{ij} + t_{i,j} \leq s_{i,j+1} & \forall i \in \mathcal{I}, j \in \{1, \ldots, N_i - 1\} \\
& e_i = D_i - s_{i,N_i} - P_{i,N_i} & \forall i \in \mathcal{I} \\
& s_{ij} + P_{ij} + g_{ij} + M(1 - y_{ijkl}) \geq s_{kl} & \forall (i,k) \in \{\mathcal{I}^2 | k \neq i\}, j \in \{1, \ldots, N_i\}, l \in \{1, \ldots, N_k\} \\
& s_{ij} + P_{ij} + g_{ij} \leq M(1 - y_{ijkl}) + s_{kl} & \forall (i,k) \in \{\mathcal{I}^2 | k \neq i\}, j \in \{1, \ldots, N_i\}, l \in \{1, \ldots, N_k\} \\
& \sum_{i \in \mathcal{I}} \sum_{j=1}^{N_i} \sum_{k \in \mathcal{I}, k \neq i} \sum_{l=1}^{N_k} y_{ijkl} = \sum_{i \in \mathcal{I}} N_i - 1 & \\
& \sum_{i \in \mathcal{I}} \sum_{j=1}^{N_i} g_{ij} + \sum_{i \in \mathcal{I}} \sum_{j=1}^{N_i} P_{ij} = M & \\
& \sum_{k \in \mathcal{I}} \sum_{l=1}^{N_k} y_{ijkl} \leq 1 & \forall i \in \mathcal{I}, j \in \{1, \ldots, N_i\} \\
& \sum_{k \in \mathcal{I}} \sum_{l=1}^{N_k} y_{klij} \leq 1 & \forall i \in \mathcal{I}, j \in \{1, \ldots, N_i\} \\
& t_{ij} \geq T & \forall i \in \{\mathcal{I}, | N_i > 1\}, \forall j \in \mathcal{J} \\
& s_{ij}, t_i, e_i, g_{ij} \geq 0 & \forall i \in \mathcal{I}, j \in \mathcal{J} \\
& y_{ijkl} \in \{0, 1\} & \forall i \in \mathcal{I}, j \in \mathcal{J}, k \in \mathcal{I}, l \in \mathcal{J}
\end{array}
$$

Contraintes

Modèle mathématique

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

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

Un successeur au maximum

Stricte succession des opérations

Contraintes

Modèle mathématique

$$
\begin{array}{lll}
\min & z_{\text{inventory}} = \sum_{i \in \mathcal{I}} Q_i(e_i + t_i - T) & \\
\min & z_{\text{setup}} = \sum_{i,j,k>i,l} Y_{ijkl}\ y_{ijkl} & \\
\text{s.t.} & s_{ij} + P_{ij} + t_{i,j} \leq s_{i,j+1} & \forall i \in \mathcal{I}, j \in \{1, \ldots, N_i - 1\} \\
& e_i = D_i - s_{i,N_i} - P_{i,N_i} & \forall i \in \mathcal{I} \\
& s_{ij} + P_{ij} + g_{ij} + M(1 - y_{ijkl}) \geq s_{kl} & \forall (i,k) \in \{\mathcal{I}^2 | k \neq i\}, j \in \{1, \ldots, N_i\}, l \in \{1, \ldots, N_k\} \\
& s_{ij} + P_{ij} + g_{ij} \leq M(1 - y_{ijkl}) + s_{kl} & \forall (i,k) \in \{\mathcal{I}^2 | k \neq i\}, j \in \{1, \ldots, N_i\}, l \in \{1, \ldots, N_k\} \\
& \sum_{i \in \mathcal{I}} \sum_{j=1}^{N_i} \sum_{k \in \mathcal{I}, k \neq i} \sum_{l=1}^{N_k} y_{ijkl} = \sum_{i \in \mathcal{I}} N_i - 1 & \\
& \sum_{i \in \mathcal{I}} \sum_{j=1}^{N_i} g_{ij} + \sum_{i \in \mathcal{I}} \sum_{j=1}^{N_i} P_{ij} = M & \\
& \sum_{k \in \mathcal{I}} \sum_{l=1}^{N_k} y_{ijkl} \leq 1 & \forall i \in \mathcal{I}, j \in \{1, \ldots, N_i\} \\
& \sum_{k \in \mathcal{I}} \sum_{l=1}^{N_k} y_{klij} \leq 1 & \forall i \in \mathcal{I}, j \in \{1, \ldots, N_i\} \\
& t_{ij} \geq T & \forall i \in \{\mathcal{I}, | N_i > 1\}, \forall j \in \mathcal{J} \\
& s_{ij}, t_i, e_i, g_{ij} \geq 0 & \forall i \in \mathcal{I}, j \in \mathcal{J} \\
& y_{ijkl} \in \{0, 1\} & \forall i \in \mathcal{I}, j \in \mathcal{J}, k \in \mathcal{I}, l \in \mathcal{J}
\end{array}
$$

Contraintes

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

Génération des instances

- Utilisation d’un générateur d’instances
  - Nombre de jobs $n = 10$
  - Nombre maximum d’opérations par job $m = 2$
  - Nombre de types d’opérations $|J| = 2$

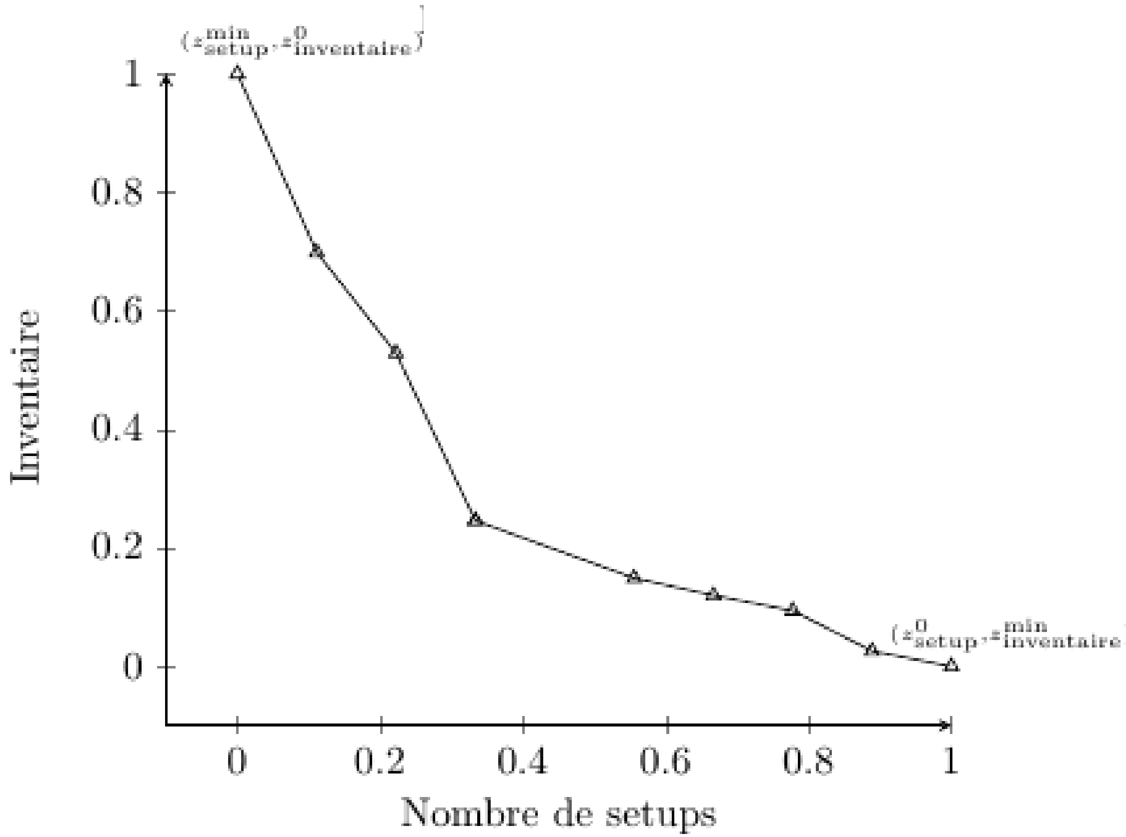
Six configurations différentes – 20 instances par configuration

T	**Distribution du nombre d’opérations**
4 40	80% - 20% 50% - 50% 20% - 80%

Approche bi-objectif

Expérimentations numériques et résultats

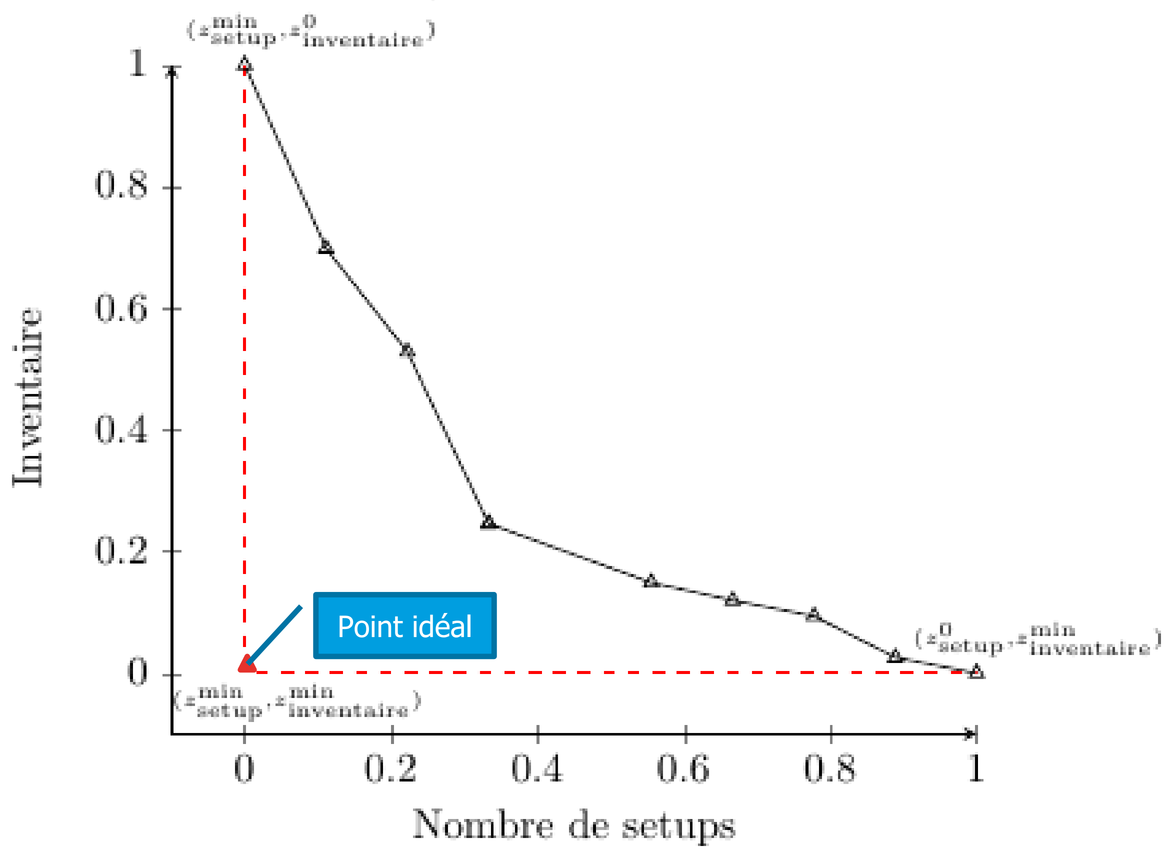
- Détermination d'un front de Pareto via la méthode ε-contrainte



Approche bi-objectif

Expérimentations numériques et résultats

- Détermination du point idéal

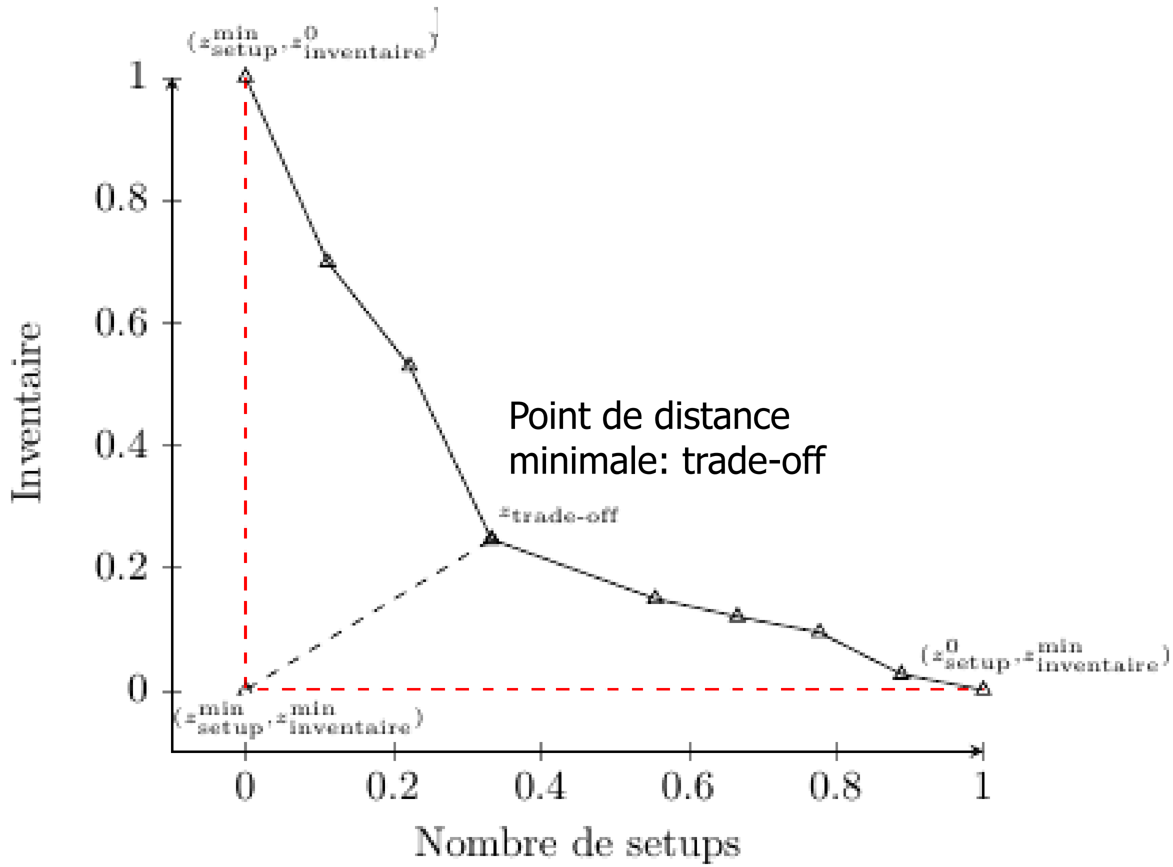


Laboratoire
Décision et Information
Pour les Systèmes de Production

Approche bi-objectif

Expérimentations numériques et résultats

- Détermination du point de trade-off: distance euclidienne



Laboratoire
Décision et Information
Pour les Systèmes de Production

Résultats

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

Résultats

Expérimentations numériques et résultats

Résultats moyennés pour T = 4

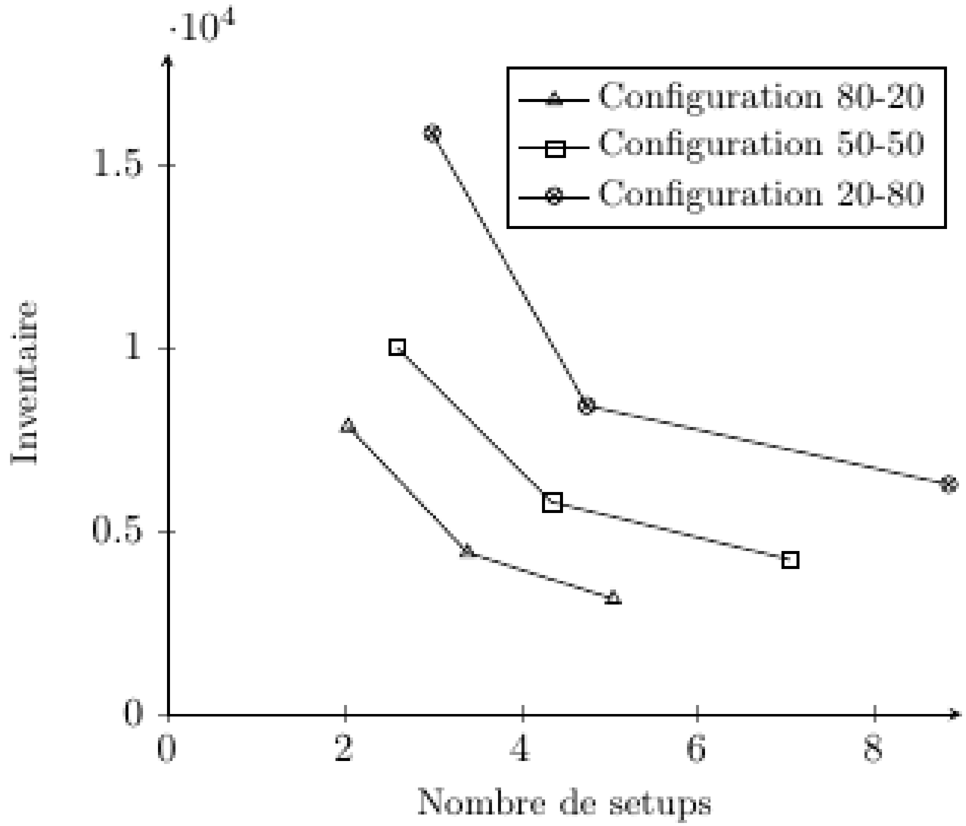
Configuration 50% - 50%

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

Résultats

Expérimentations numériques et résultats



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

CONCLUSION ET PERSPECTIVES

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

  Méthodes approchées

  - Evaluation des coûts des déchets et d'inventaire pour une meilleure estimation de l'impact économique

Références

- 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

Laboratoire
Décision et Information
Pour les Systèmes de Production

Session GT Bermudes, 9/10/2017

Corentin Le Hesran, doctorant 2e 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
La Région Auvergne-Rhône-Alpes

INSA INSTITUT NATIONAL DES SCIENCES APPLIQUÉES LYON
Université Claude Bernard Lyon 1
UNIVERSITÉ LUMIÈRE LYON 2
EVS
UNIVERSITÉ DE LYON

Approche bi-objectif

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.

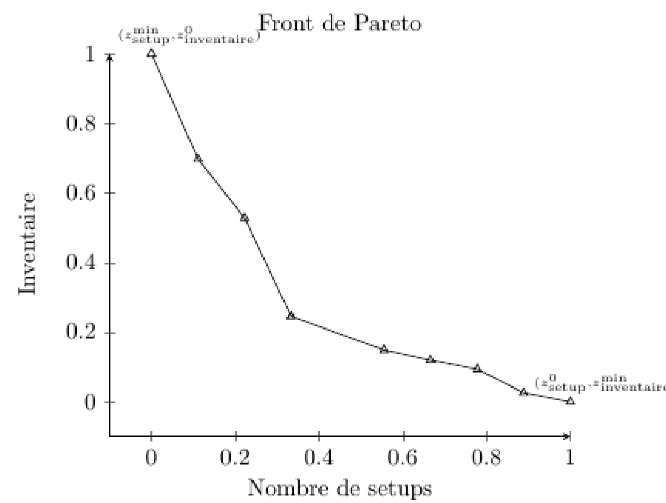
while problem is feasible **do**

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. it = it + 1

end while



Job-Shop Réentrant

$$\text{minimize } C_{\max} \tag{13}$$

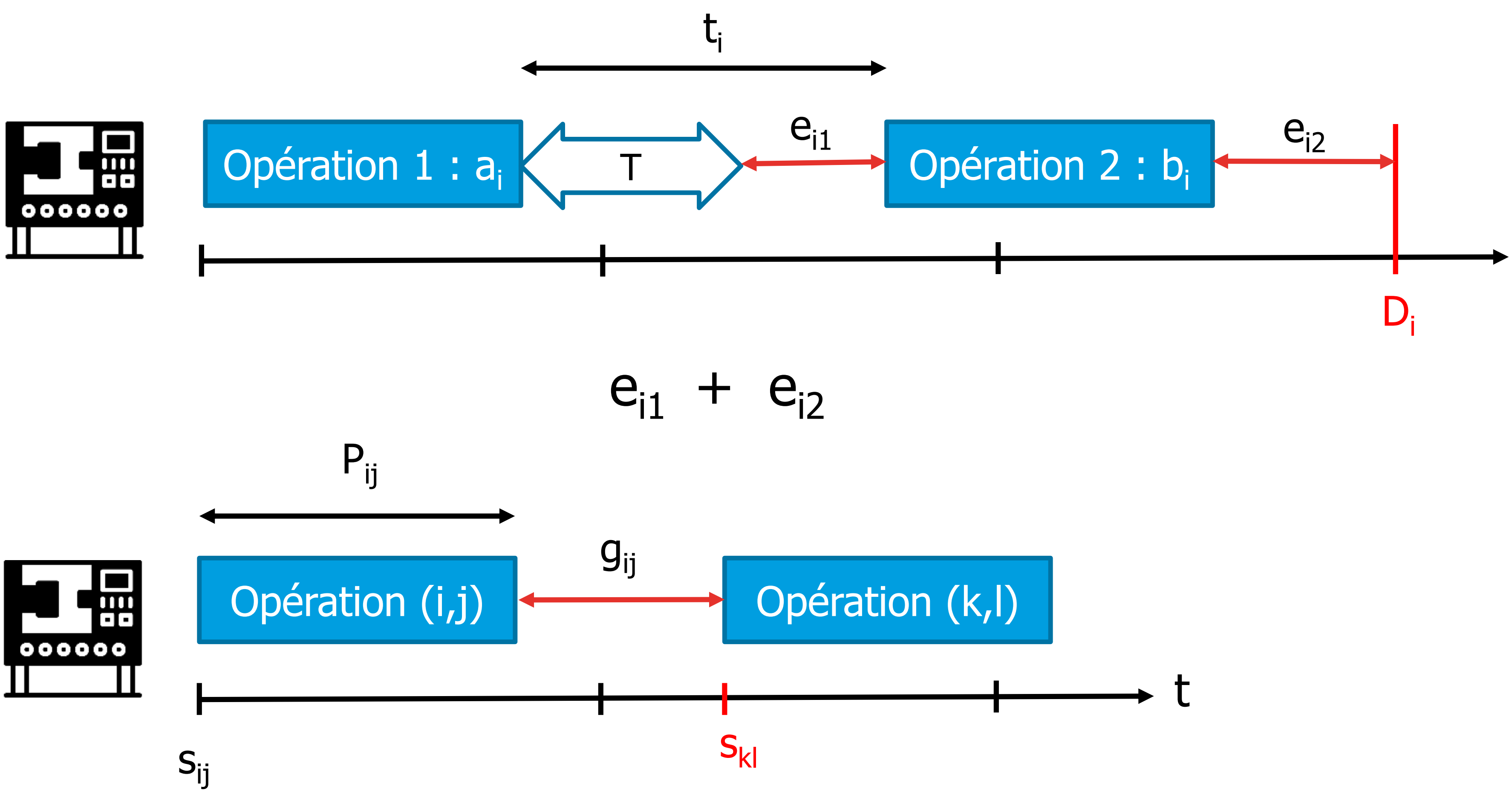
$$\text{subject to } \sum_{k=1}^{m} r_{ijk}(s_{ij} + p_{ij}) \leq \sum_{k=1}^{m} r_{i,j+1,k} S_{i,j+1} \quad i = 1, 2, \ldots, n, \quad j = 1, 2, \ldots, N_i - 1$$

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

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

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

$$C_{\max} \geq 0, \quad s_{ij} \geq 0, \quad i = 1, 2, \ldots, n, \quad j = 1, 2, \ldots, N_i,$$
$$Z_{iji'j'} = 0 \text{ or } 1, \quad 1 \leq i < i' \leq n, \quad j = 1, 2, \ldots, N_i$$
$$j' = 1, 2, \ldots, N_{i'}, \quad k = 1, 2, \ldots, m.$$



t_i
Opération 1 : a_i
T
e_i1
Opération 2 : b_i
e_i2
D_i
e_i1 + e_i2
P_ij
g_ij
Opération (i,j)
Opération (k,l)
t
S_ij
S_kl