



bpifrance

ROADEF
2017



22 - 23 - 24 février 2017

Metz

JOB-SHOP FLEXIBLE SOUS CONTRAINTE ÉNERGÉTIQUE

Damien LAMY, Sylverin KEMMOE-TCHOMTE, Nikolay TCHERNEV

LIMOS (UMR CNRS 6158), Clermont-Ferrand, France

Introduction

- L'industrie consomme **50% de l'énergie** par an (EIA 2013)
- Fortes émissions en **GES**
- **Actions** pour réduire l'impact environnemental

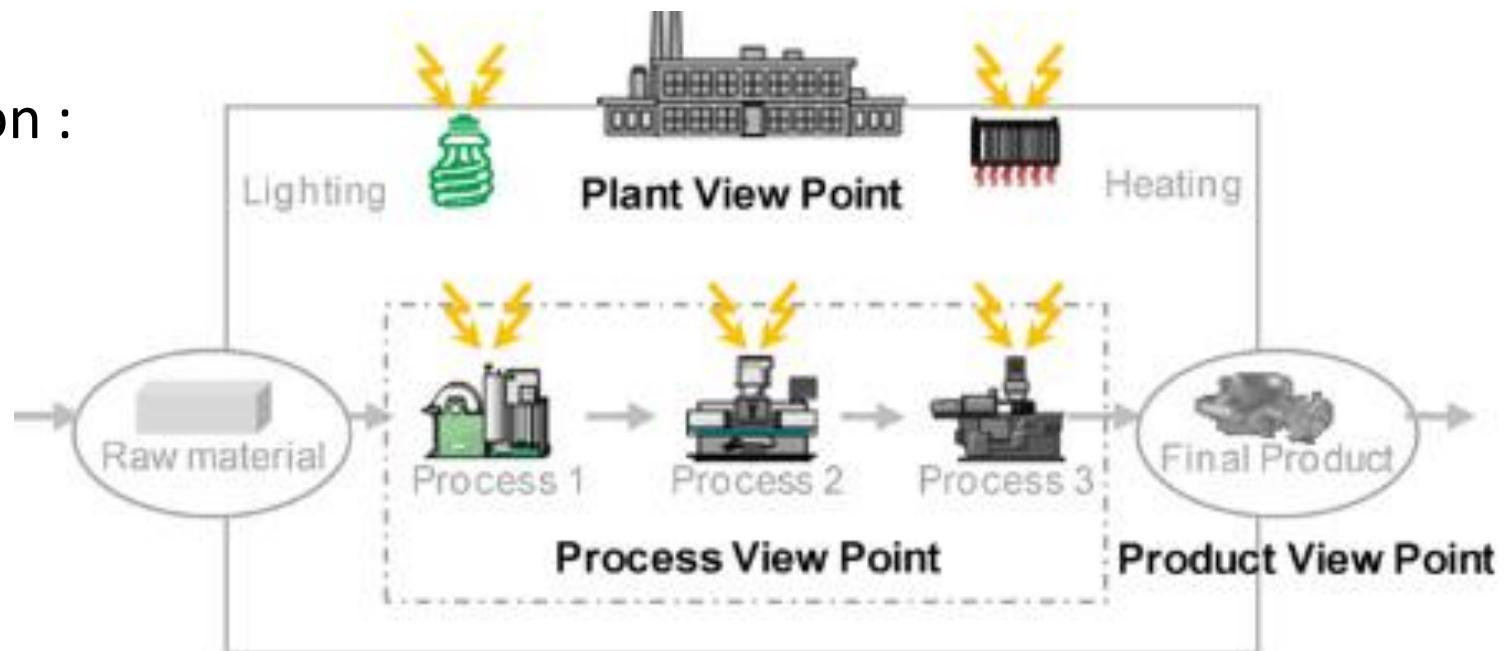
Méthodes et outils pour optimiser la production sous contrainte énergétique

Plan

- I. Etat de l'art
- II. Job-shop Flexible sous contrainte énergétique
 - I. Modélisation
 - II. Résultats

Etat de l'art : Approches

- (Duflou et al., 2012)
 - Améliorations **technologiques ou organisationnelles**
- (Dai et al., 2013) - Optimisation :
 - **Produit (conception)**
 - **Machine**
 - **Système**



(Seow and Rahimifard, 2011)

Etat de l'art : Approches

■ Produit :

- **Stratégiquement** intéressant
- Nécessite des outils performants (simulation)
- **Coûteux**

Etat de l'art : Approches

■ Produit :

- Stratégiquement intéressant
- Nécessite des outils performants (simulation)
- Coûteux

■ Machine :

- Energétiquement efficace
- Coûteux

Etat de l'art : Approches

■ Produit :

- Stratégiquement intéressant
- Nécessite des outils performants (simulation)
- Coûteux

■ Machine :

- Energétiquement efficace
- Coûteux

■ Système de Production

- Rapport **investissement/résultat** intéressant
- Minimiser les consommations énergétiques
- Faible investissement : **matériel existant**

JOB-SHOP FLEXIBLE SOUS CONTRAINTE ÉNERGÉTIQUE

Etat de l'art : Problèmes étudiés

- Réduire la **consommation globale**
- Répartir la charge entre **HP/HC**
- Eviter de dépasser un **pic de consommation**

References	Single Machine	Flow-shop	Flexible Flow-shop	Job-shop	Flexible Job-shop	Carbon footprint	Consummation Pics	Total Energy	Energy Price (TOU)	Makespan	Total Tardiness	Robustness
Bruzzone et al., 2012		x					x			x	x	
Dai et al., 2013		x						x		x		
Fang et al., 2011		x				x	x			x		
He et al., 2005				x				x		x		
He et al., 2015					x			x		x		
Liu et al., 2014				x				x			x	
Luo et al., 2013		x							x	x	x	
Mouzon et al., 2007	x							x		x		
Salido et al., 2015			x					x		x	x	
Shrouf et al., 2014	x								x			
Xu et al., 2014		x					x			x	x	
Zhang et al., 2014	x					x		x		x		
May et al., 2015			x	x				x		x		

Etat de l'art : Problèmes étudiés

■ Réduire la **consommation globale** :

- Eteindre les machines oisives
- Vitesses d'usinage variables
- Réduire la durée d'inactivité

■ Répartir la charge entre **HP/HC** :

- Tarification par périodes
- Échanges entre le fournisseur et le client (Nolde and Morari, 2010)

■ Eviter de dépasser un **pic de consommation**

- Problème : quelle précision ?

Etat de l'art : Problèmes étudiés

■ Réduire la **consommation globale** :

- Eteindre les machines oisives
- Vitesses d'usinage variables
- Réduire la durée d'inactivité

■ Répartir la charge entre **HP/HC** :

- Tarification par périodes
- Échanges entre le fournisseur et le client (Nolde and Morari, 2010)

■ Eviter de dépasser un **pic de consommation**

- Problème : quelle précision ?

Etat de l'art : Problèmes étudiés

■ Réduire la **consommation globale** :

- Eteindre les machines oisives
- Vitesses d'usinage variables
- Réduire la durée d'inactivité

■ Répartir la charge entre **HP/HC** :

- Tarification par périodes
- Échanges entre le fournisseur et le client (Nolde and Morari, 2010)

■ Eviter de dépasser un **pic de consommation**

- Problème : quelle précision ?

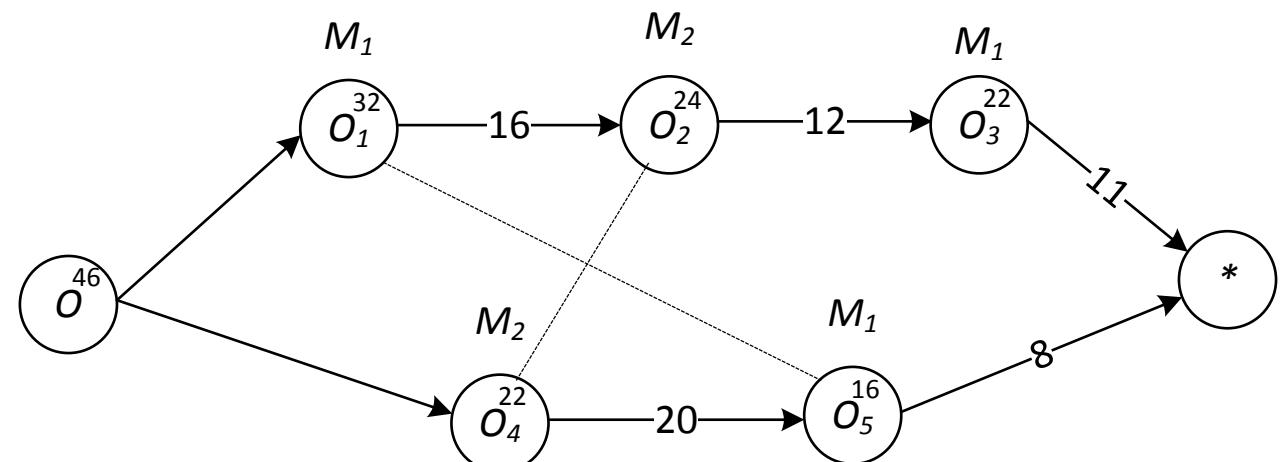
Petit rappel et extension

- Un ensemble de jobs à ordonner
- Chaque Job a un ensemble d'opérations
- Chaque opération peut être traitée sur un ensemble de machines

- Pas de préemption
- Objectif: Makespan

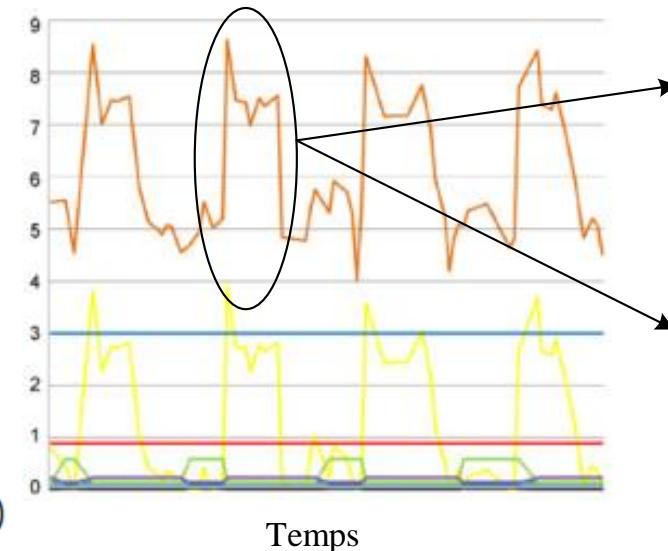
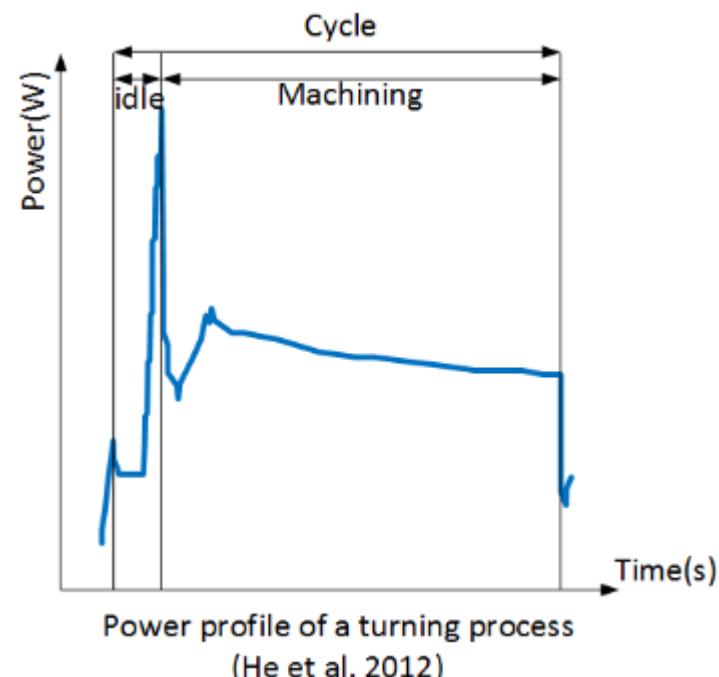
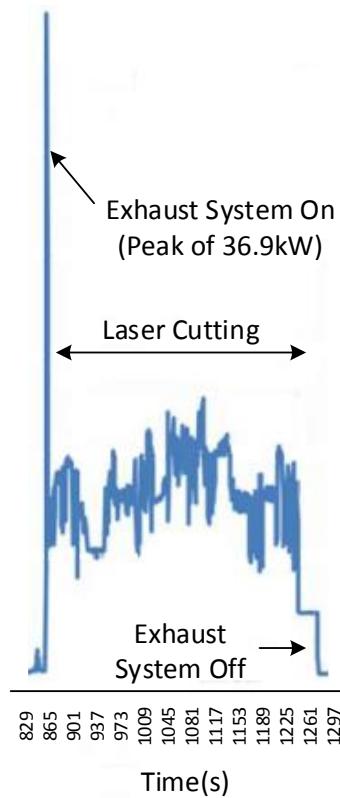
	O_1	O_2	O_3
J1	$(M_1;16)$	$(M_2;12)(M_1;25)$	$(M_1;11)$
J2	$(M_2;20)(M_1;30)$	$(M_1;8)$	

	e_1	e_2	e_3
J1	$(M_1;32)$	$(M_2;24)(M_1;15)$	$(M_1;22)$
J2	$(M_2;22)(M_1;20)$	$(M_1;16)$	



Etat de l'art : Prise en compte des pics de consommation

■ Eviter de dépasser un pic de consommation : quelle précision ?



Représentation issue de la littérature

Notre modélisation

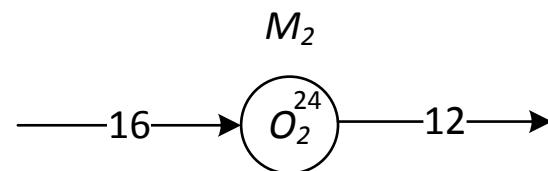
Profil énergétique d'une machine CNC
(Duflou et al., 2012)

Job-shop Flexible sous contrainte énergétique: Modélisation

- Modéliser des opérations avec un pic de consommation énergétique et des extinctions de machine:

Job-shop Flexible sous contrainte énergétique: Modélisation

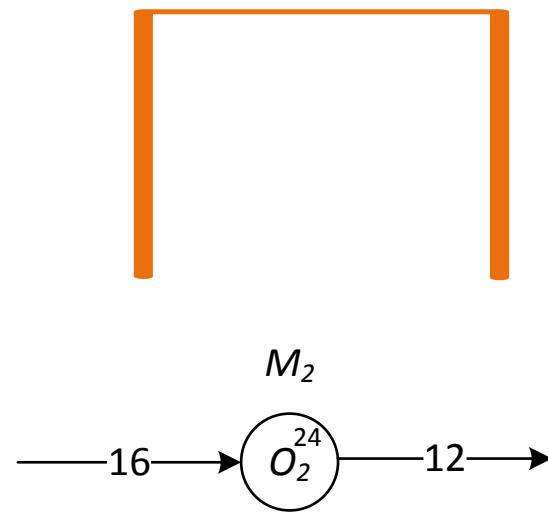
- Modéliser des opérations avec un pic de consommation énergétique et des extinctions de machine:



N sommets dans le graphe

Job-shop Flexible sous contrainte énergétique: Modélisation

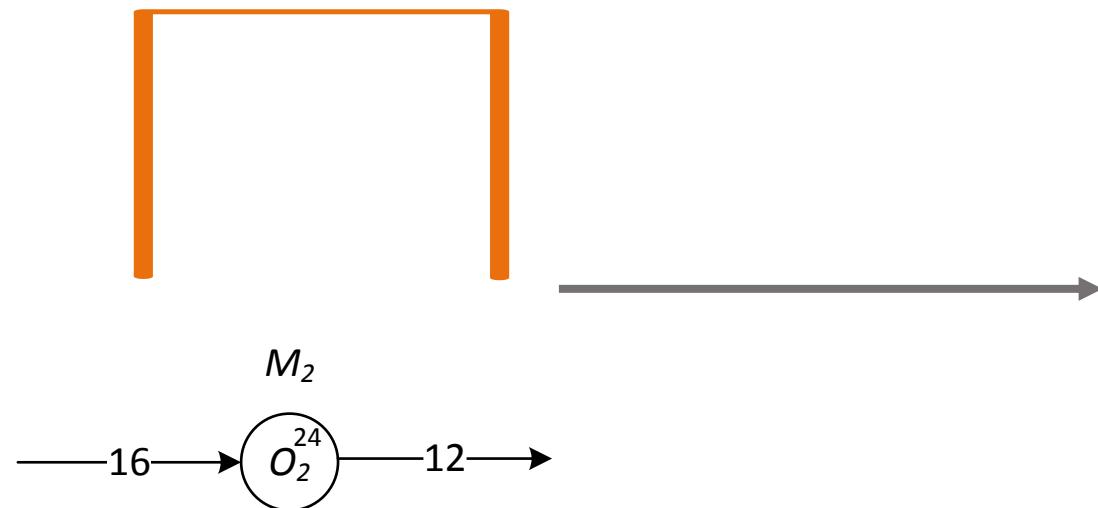
- Modéliser des opérations avec un pic de consommation énergétique et des extinctions de machine:



N sommets dans le graphe

Job-shop Flexible sous contrainte énergétique: Modélisation

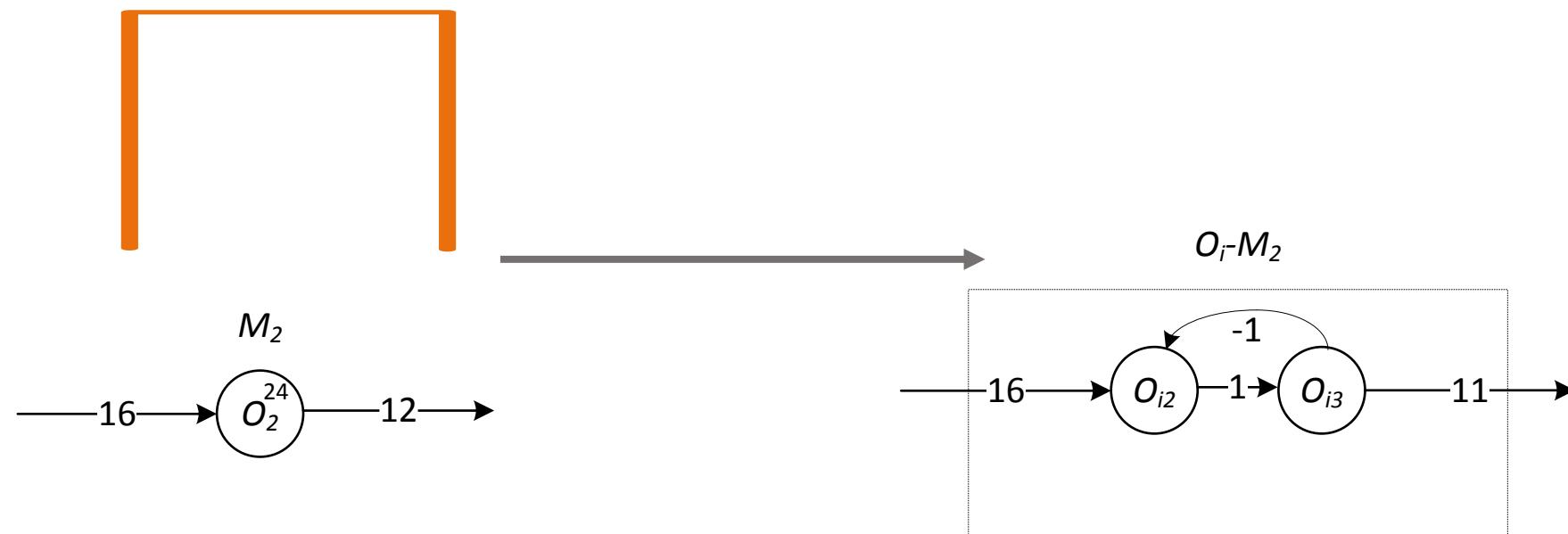
- Modéliser des opérations avec un pic de consommation énergétique et des extinctions de machine:



N sommets dans le graphe

Job-shop Flexible sous contrainte énergétique: Modélisation

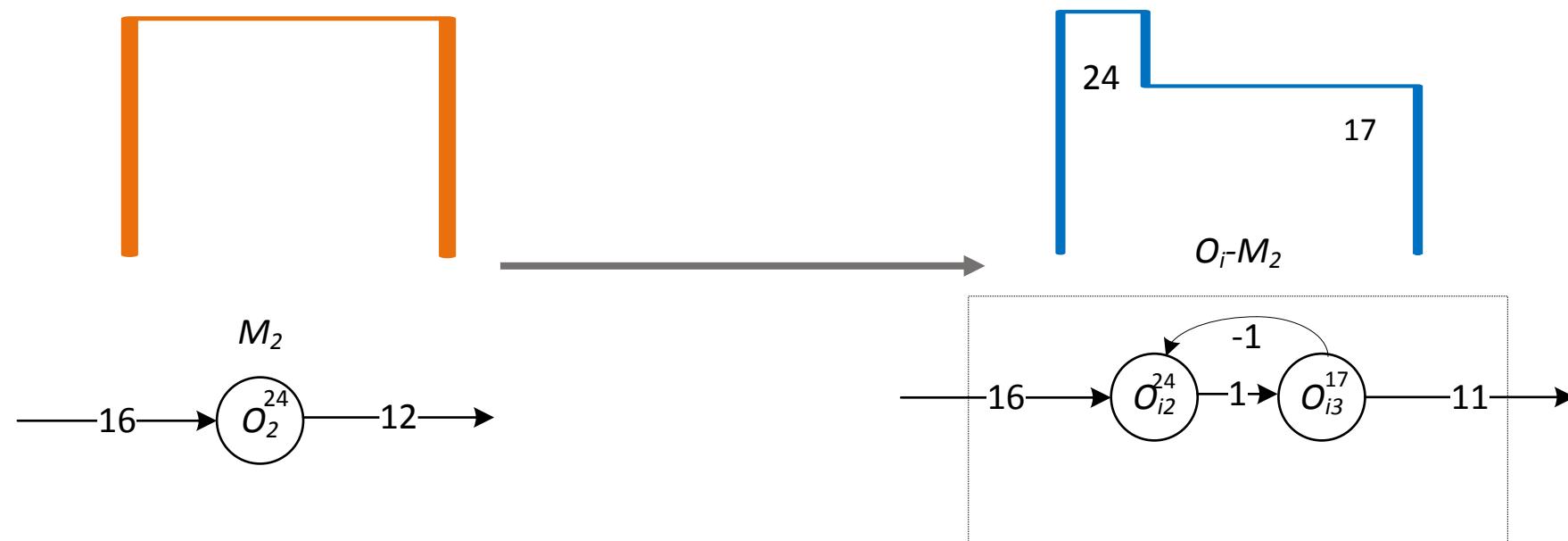
- Modéliser des opérations avec un pic de consommation énergétique et des extinctions de machine:



N sommets dans le graphe

Job-shop Flexible sous contrainte énergétique: Modélisation

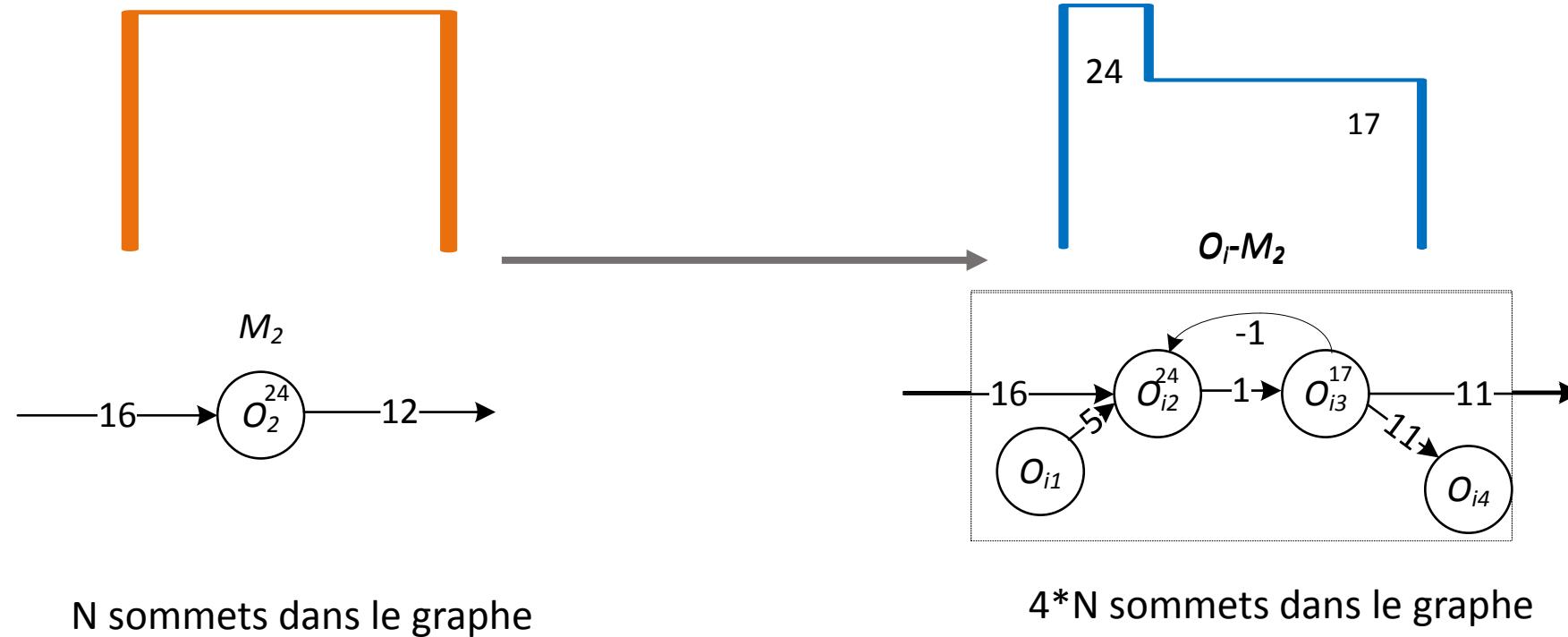
- Modéliser des opérations avec un pic de consommation énergétique et des extinctions de machine:



N sommets dans le graphe

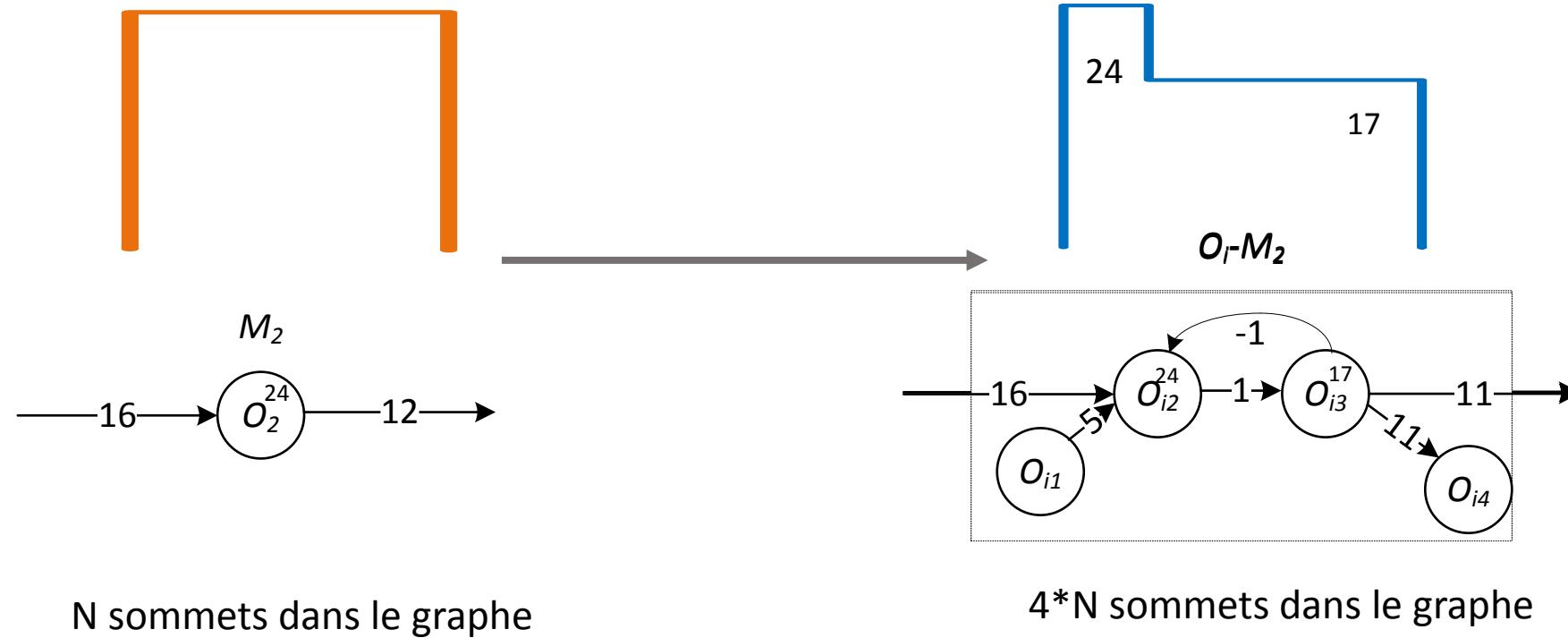
Job-shop Flexible sous contrainte énergétique: Modélisation

- Modéliser des opérations avec un pic de consommation énergétique et des extinctions de machine:



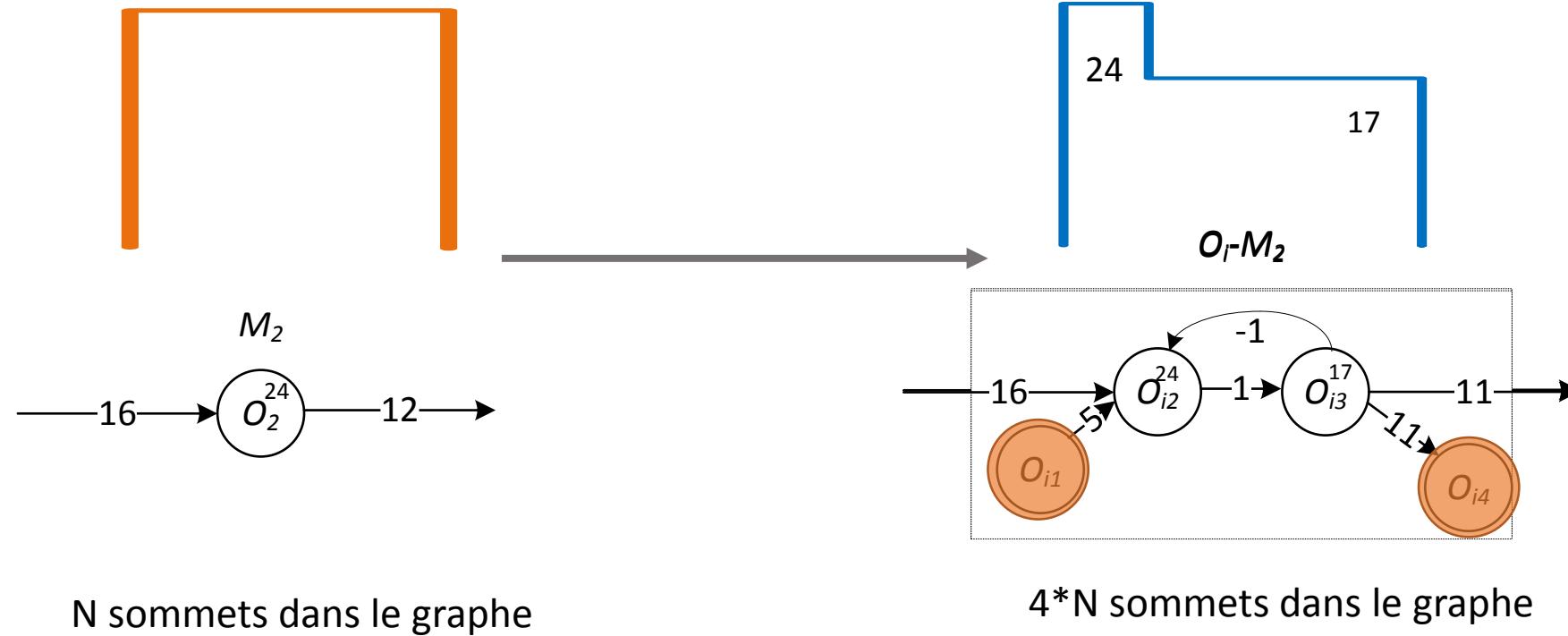
Job-shop Flexible sous contrainte énergétique: Modélisation

- Modéliser des opérations avec un pic de consommation énergétique et des extinctions de machine:



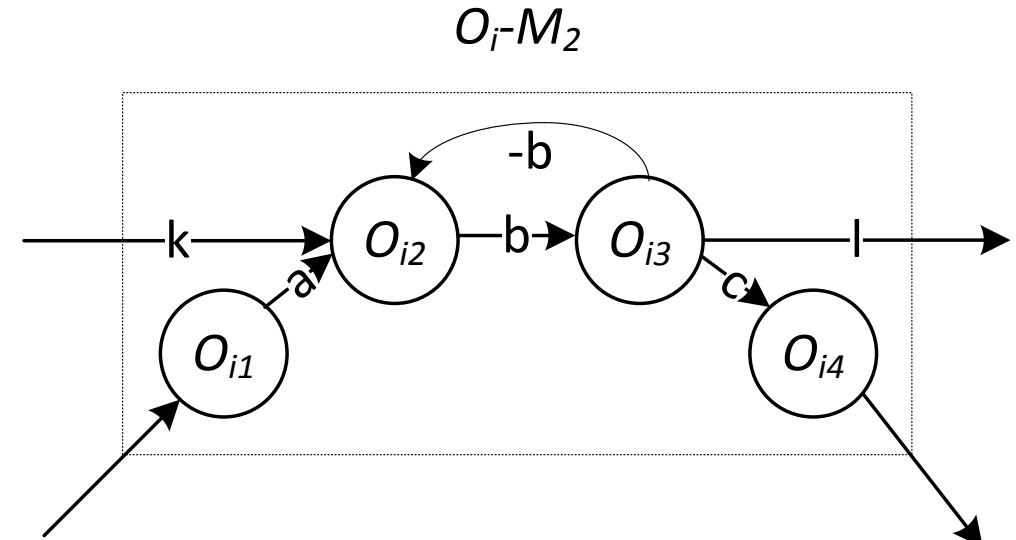
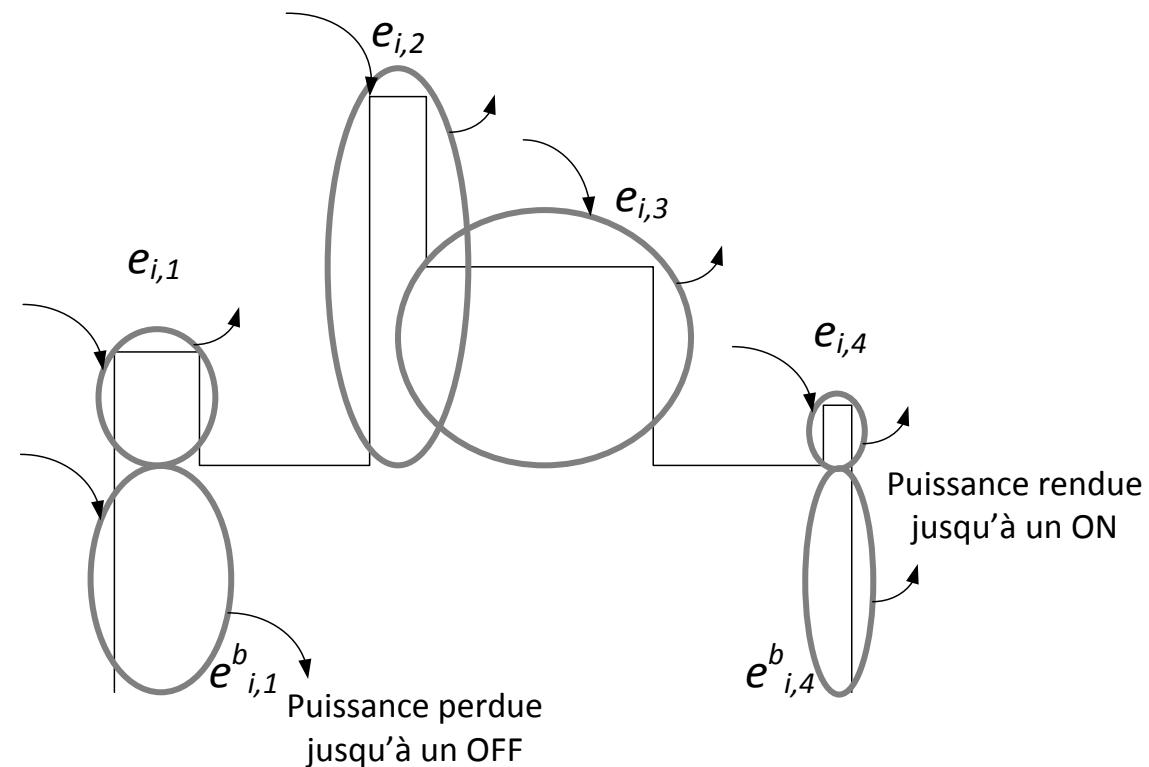
Job-shop Flexible sous contrainte énergétique: Modélisation

- Modéliser des opérations avec un pic de consommation énergétique et des extinctions de machine:



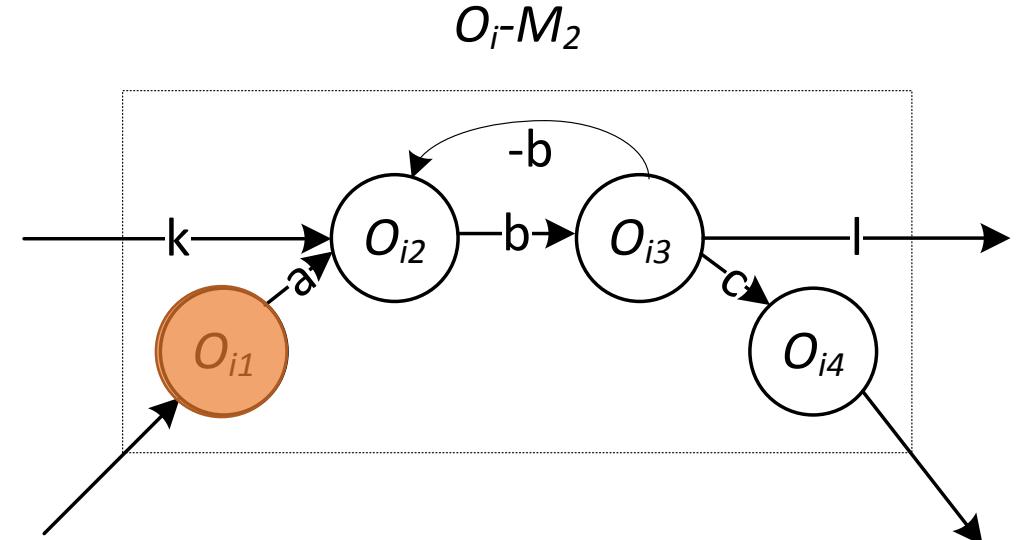
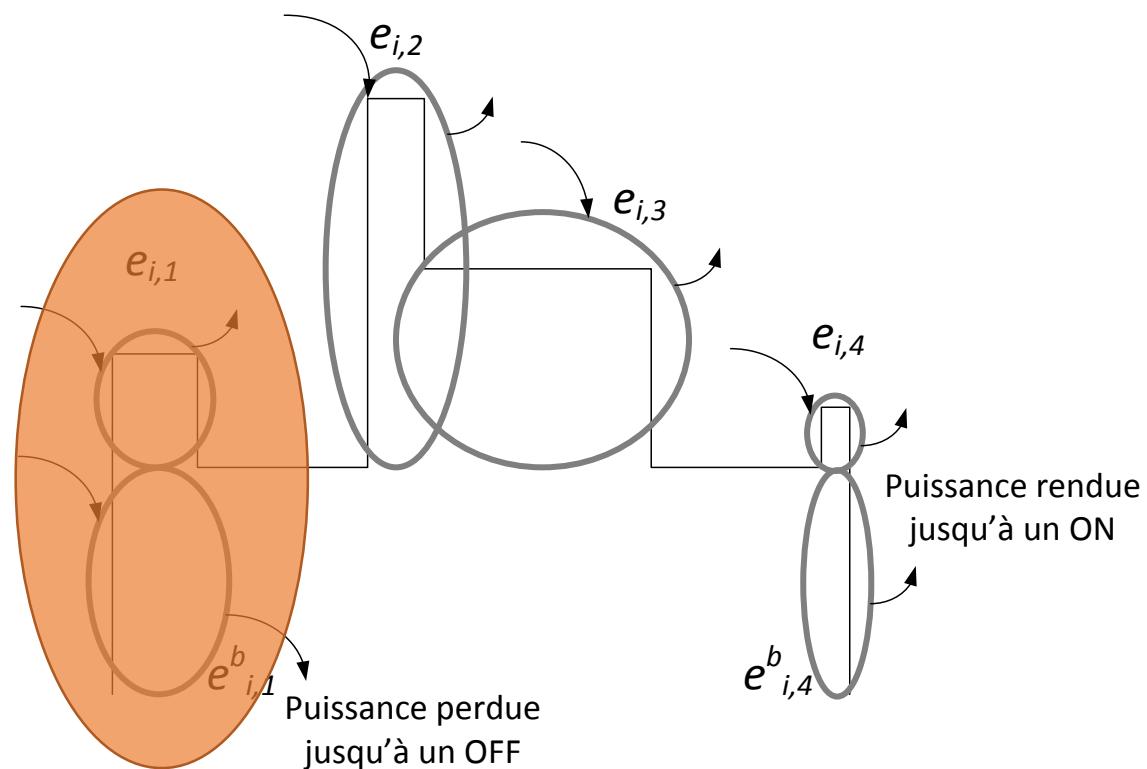
Job-shop Flexible sous contrainte énergétique: Modélisation

Résumé:



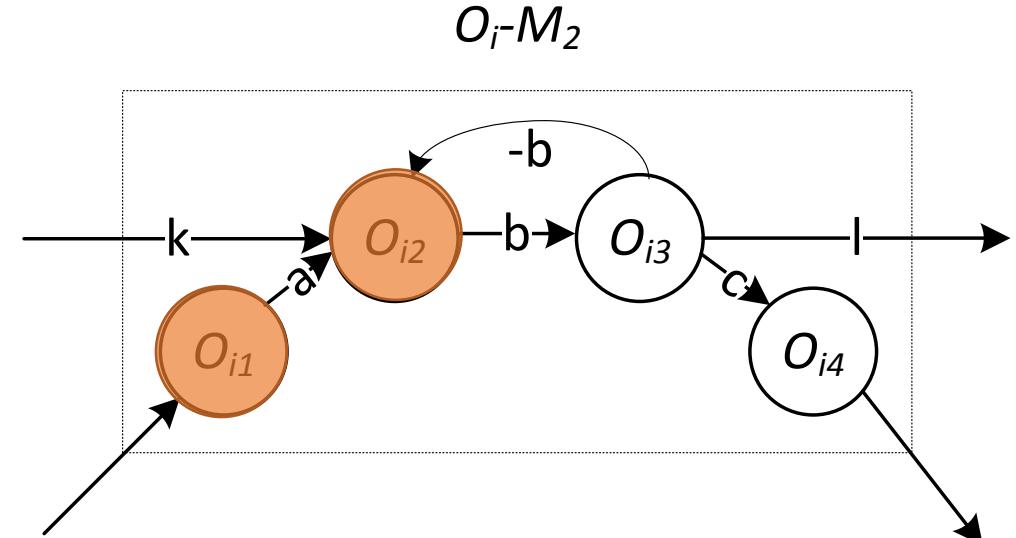
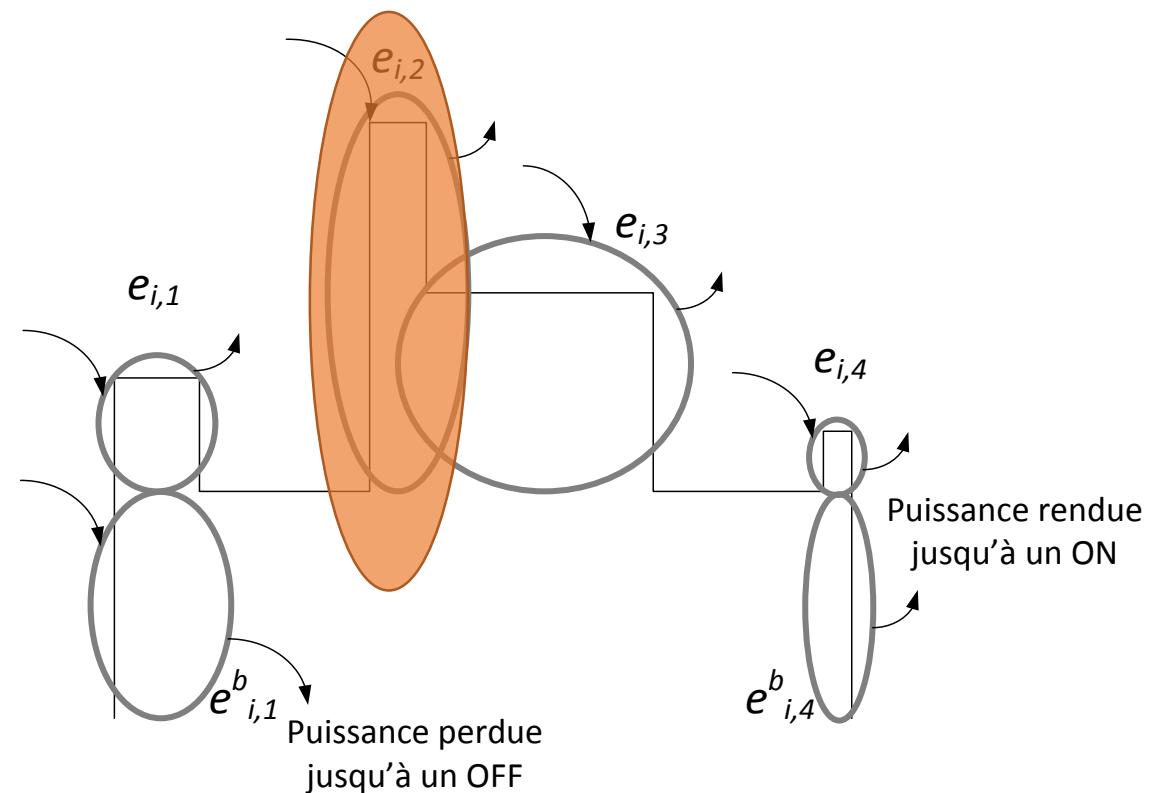
Job-shop Flexible sous contrainte énergétique: Modélisation

Résumé:



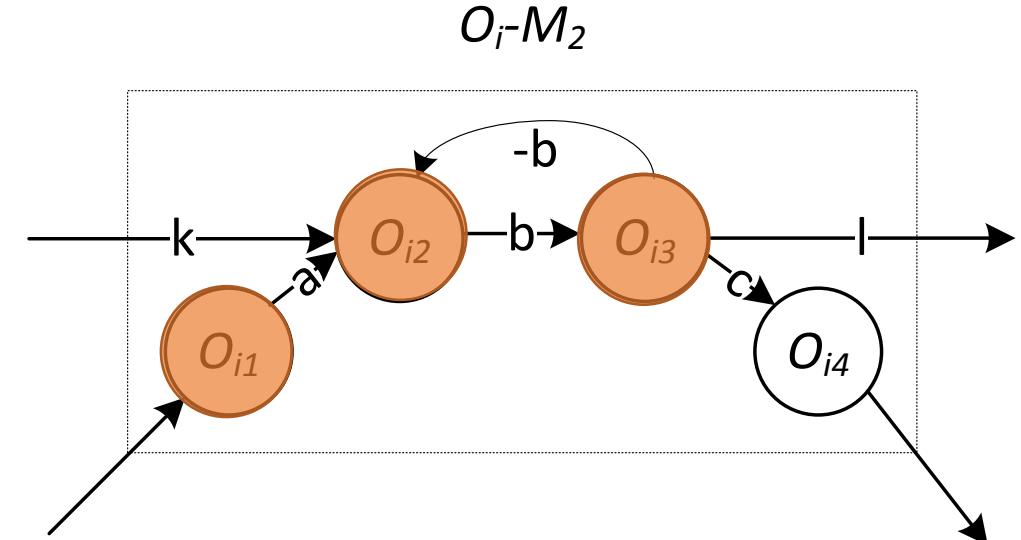
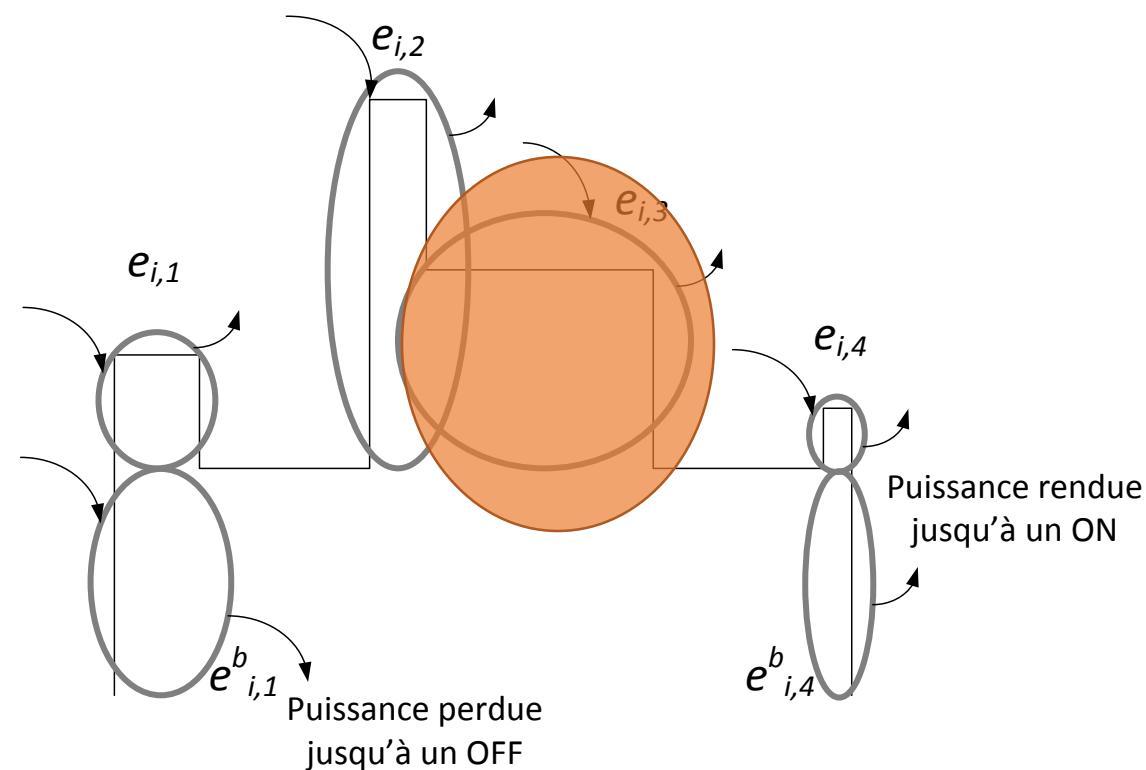
Job-shop Flexible sous contrainte énergétique: Modélisation

Résumé:



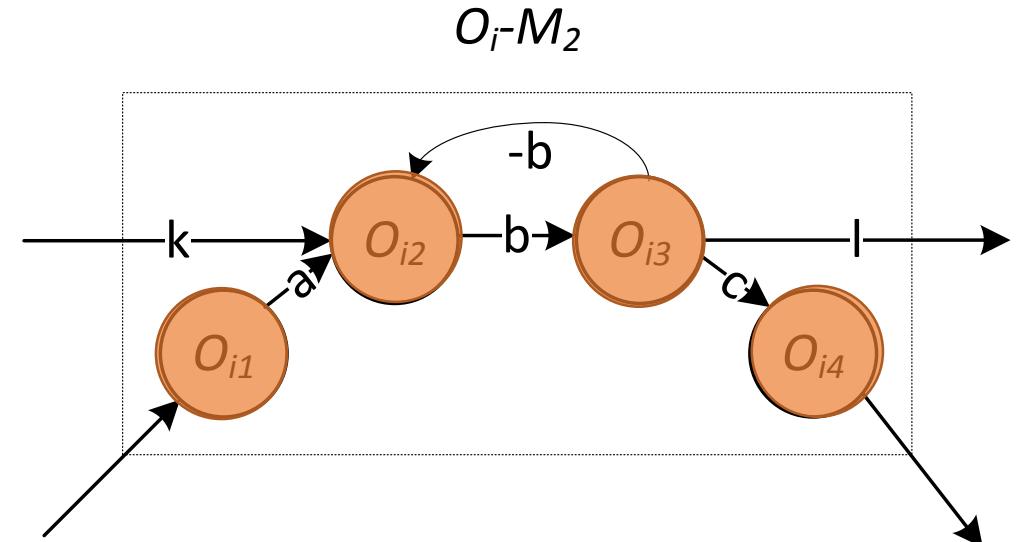
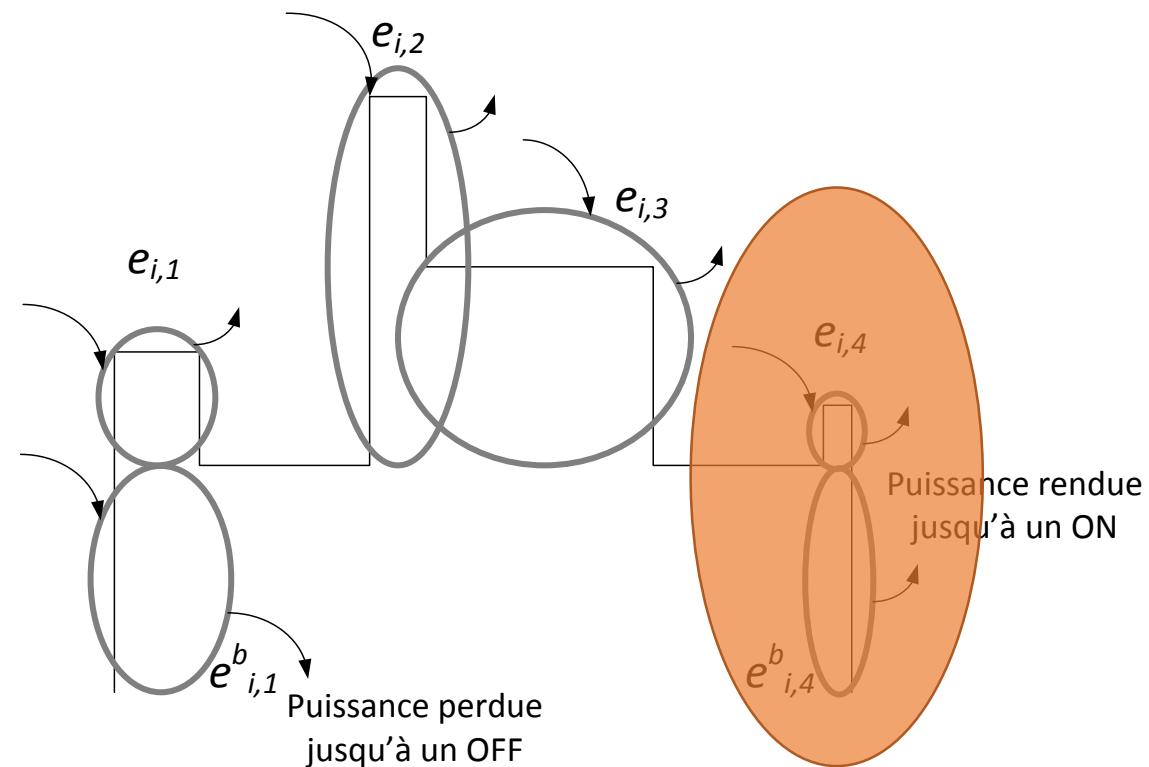
Job-shop Flexible sous contrainte énergétique: Modélisation

Résumé:



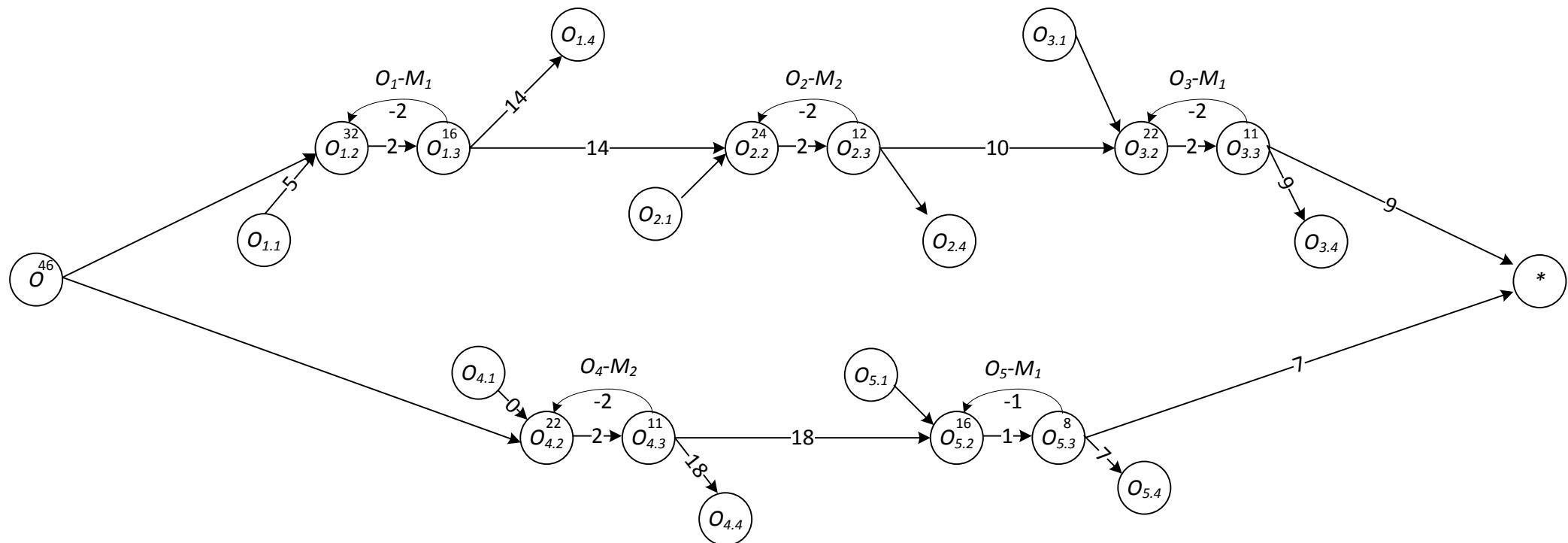
Job-shop Flexible sous contrainte énergétique: Modélisation

Résumé:



Job-shop Flexible sous contrainte énergétique: Modélisation

■ Nouveau graphe:



Job-shop Flexible sous contrainte énergétique: Modélisation

- Fonction objectif:

$$\text{Min } C_{\max}$$

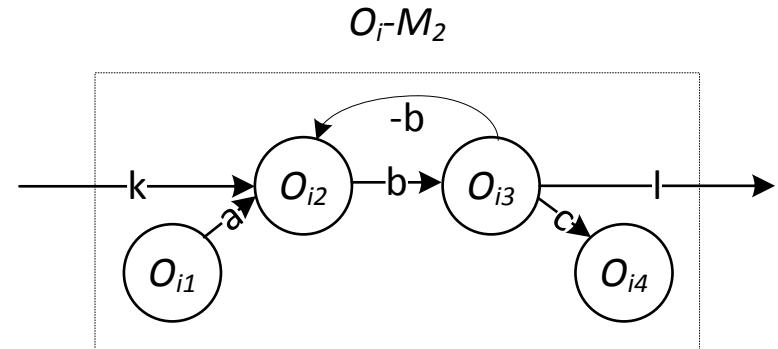
- S.t.

$$C_{\max} - s_{i,3} - p_{i,3} \geq 0 \quad \forall i \in V$$

- Contraintes d'affectations

$$\sum_{m \in M_i} y_{i,m} = 1, \forall i \in V$$

$$p_{i,k} - \sum_{m \in M_i} y_{i,m} P_{i,k,m} = 0, \forall i \in V, \forall k \in \{2,3\}$$



Job-shop Flexible sous contrainte énergétique: Modélisation

- Fonction objectif:

$$\text{Min } C_{\max}$$

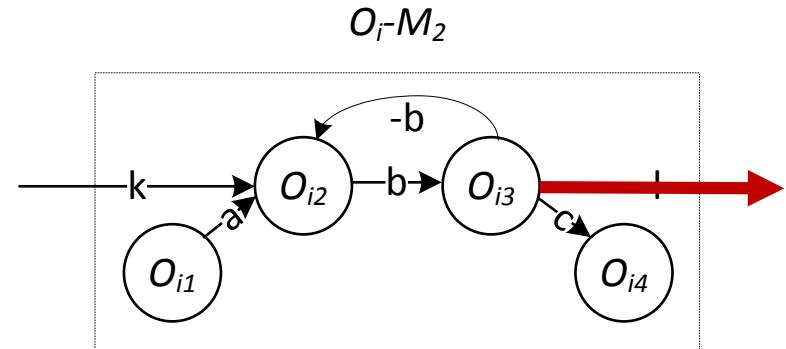
- S.t.

$$C_{\max} - s_{i,3} - p_{i,3} \geq 0 \quad \forall i \in V$$

- Contraintes d'affectations

$$\sum_{m \in M_i} y_{i,m} = 1, \forall i \in V$$

$$p_{i,k} - \sum_{m \in M_i} y_{i,m} P_{i,k,m} = 0, \forall i \in V, \forall k \in \{2,3\}$$



Job-shop Flexible sous contrainte énergétique: Modélisation

- Fonction objectif:

$$\text{Min } C_{\max}$$

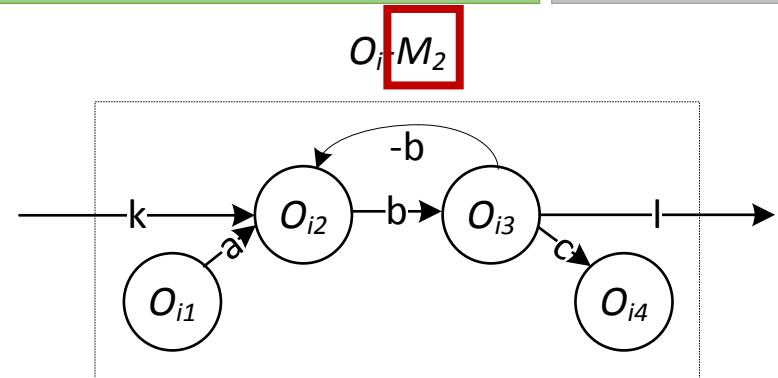
- S.t.

$$C_{\max} - s_{i,3} - p_{i,3} \geq 0 \quad \forall i \in V$$

- Contraintes d'affectations

$$\sum_{m \in M_i} y_{i,m} = 1, \forall i \in V$$

$$p_{i,k} - \sum_{m \in M_i} y_{i,m} P_{i,k,m} = 0, \forall i \in V, \forall k \in \{2,3\}$$



Job-shop Flexible sous contrainte énergétique: Modélisation

- Fonction objectif:

$$\text{Min } C_{\max}$$

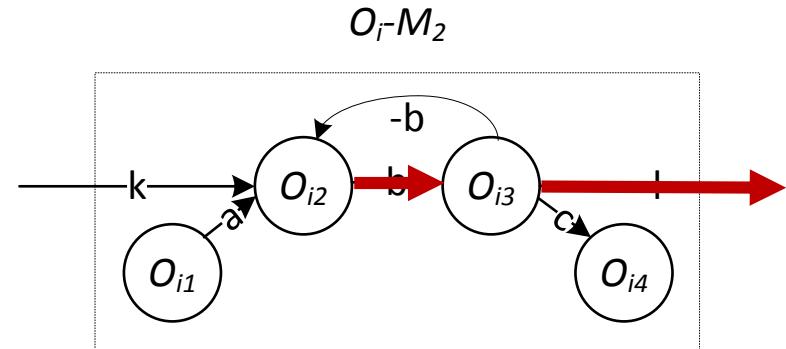
- S.t.

$$C_{\max} - s_{i,3} - p_{i,3} \geq 0 \quad \forall i \in V$$

- Contraintes d'affectations

$$\sum_{m \in M_i} y_{i,m} = 1, \forall i \in V$$

$$p_{i,k} - \sum_{m \in M_i} y_{i,m} P_{i,k,m} = 0, \forall i \in V, \forall k \in \{2,3\}$$



Job-shop Flexible sous contrainte énergétique: Modélisation

- Fonction objectif:

$$\text{Min } C_{\max}$$

- S.t.

$$C_{\max} - s_{i,3} - p_{i,3} \geq 0 \quad \forall i \in V$$

- Contraintes d'affectations

$$\sum_{m \in M_i} y_{i,m} = 1, \forall i \in V$$

$$p_{i,k} - \sum_{m \in M_i} y_{i,m} P_{i,k,m} = 0, \forall i \in V, \forall k \in \{2,3\}$$

Job-shop Flexible sous contrainte énergétique: Modélisation

■ S.t.

■ Contraintes d'ordonnancement

$$\sum_{j \in V^*, J_j \neq J_i \cup i < j} \sum_{m \in M_i \cap M_j} x_{i,j,m} = 1, \forall i \in V$$

$$\sum_{i \in V^0, J_j \neq J_i \cup i < j} \sum_{m \in M_i \cap M_j} x_{i,j,m} = 1, \forall j \in V$$

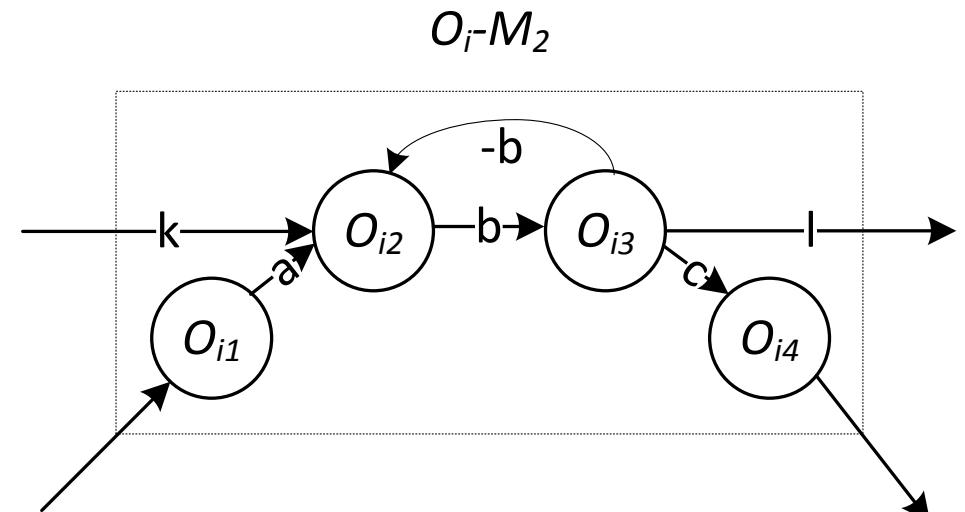
$$s_{i,l} - s_{i,k} - p_{i,k} = 0, \forall i \in V, \forall k, l \in N_i \setminus (1, |N_i|), l = k+1$$

$$s_{i,k} - s_{i,l} \geq p_{i,l}, \forall i \in V, (k, l) \in N_i, k > l$$

$$s_{j,2} - s_{i,|N_i|-1} - p_{i,|N_i|-1} \geq 0, \forall (i, j) \in V / J_i = J_j, i < j$$

$$2x_{i,j,m} + 2x_{j,i,m} \leq y_{i,m} + y_{j,m}, \forall (i, j) \in V, \forall m \in M_i \cap M_j, J_i \neq J_j \cup i < j$$

$$s_{j,1} - s_{i,|N_i|} - p_{i,|N_i|} + H(1 - x_{i,j,m}) \geq 0, \forall i, j \in V / J_i \neq J_j \cup i < j, m \in M_i \cap M_j$$



Job-shop Flexible sous contrainte énergétique: Modélisation

■ S.t.

■ Contraintes d'ordonnancement

$$\sum_{j \in V^*, J_j \neq J_i \cup i < j} \sum_{m \in M_i \cap M_j} x_{i,j,m} = 1, \forall i \in V$$

$$\sum_{i \in V^0, J_j \neq J_i \cup i < j} \sum_{m \in M_i \cap M_j} x_{i,j,m} = 1, \forall j \in V$$

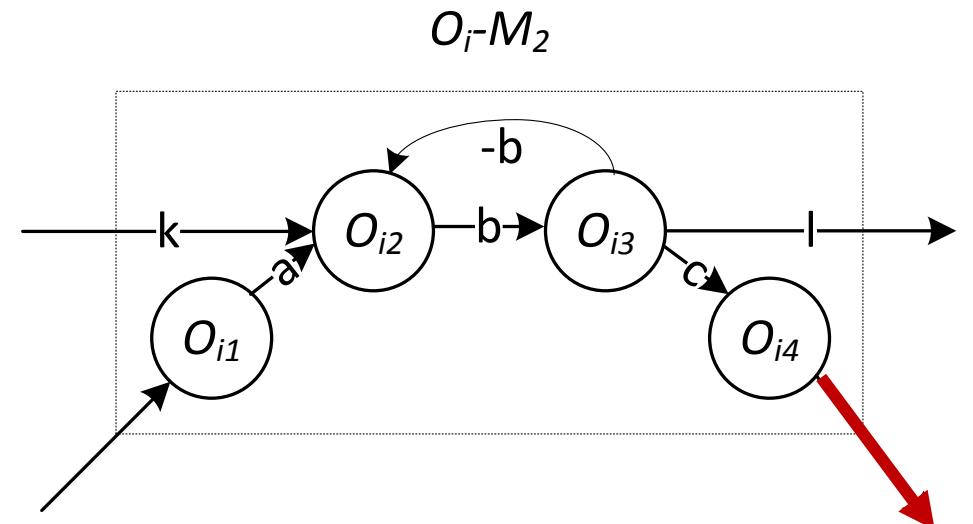
$$s_{i,l} - s_{i,k} - p_{i,k} = 0, \forall i \in V, \forall k, l \in N_i \setminus (1, |N_i|), l = k+1$$

$$s_{i,k} - s_{i,l} \geq p_{i,l}, \forall i \in V, (k, l) \in N_i, k > l$$

$$s_{j,2} - s_{i,|N_i|-1} - p_{i,|N_i|-1} \geq 0, \forall (i, j) \in V / J_i = J_j, i < j$$

$$2x_{i,j,m} + 2x_{j,i,m} \leq y_{i,m} + y_{j,m}, \forall (i, j) \in V, \forall m \in M_i \cap M_j, J_i \neq J_j \cup i < j$$

$$s_{j,1} - s_{i,|N_i|} - p_{i,|N_i|} + H(1 - x_{i,j,m}) \geq 0, \forall i, j \in V / J_i \neq J_j \cup i < j, m \in M_i \cap M_j$$



Job-shop Flexible sous contrainte énergétique: Modélisation

■ S.t.

■ Contraintes d'ordonnancement

$$\sum_{j \in V^*, J_j \neq J_i \cup i < j} \sum_{m \in M_i \cap M_j} x_{i,j,m} = 1, \forall i \in V$$

$$\sum_{i \in V^0, J_j \neq J_i \cup i < j} \sum_{m \in M_i \cap M_j} x_{i,j,m} = 1, \forall j \in V$$

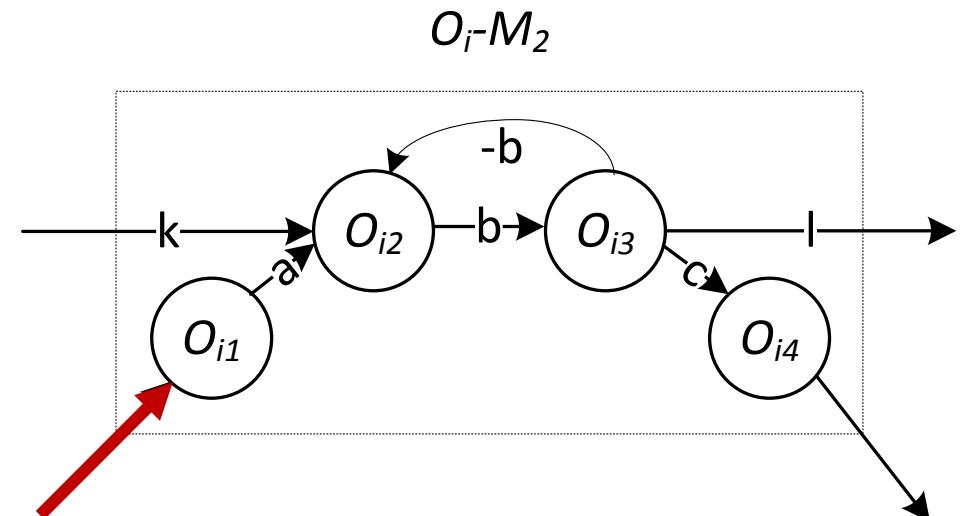
$$s_{i,l} - s_{i,k} - p_{i,k} = 0, \forall i \in V, \forall k, l \in N_i \setminus (1, |N_i|), l = k+1$$

$$s_{i,k} - s_{i,l} \geq p_{i,l}, \forall i \in V, (k, l) \in N_i, k > l$$

$$s_{j,2} - s_{i,|N_i|-1} - p_{i,|N_i|-1} \geq 0, \forall (i, j) \in V / J_i = J_j, i < j$$

$$2x_{i,j,m} + 2x_{j,i,m} \leq y_{i,m} + y_{j,m}, \forall (i, j) \in V, \forall m \in M_i \cap M_j, J_i \neq J_j \cup i < j$$

$$s_{j,1} - s_{i,|N_i|} - p_{i,|N_i|} + H(1 - x_{i,j,m}) \geq 0, \forall i, j \in V / J_i \neq J_j \cup i < j, m \in M_i \cap M_j$$



Job-shop Flexible sous contrainte énergétique: Modélisation

■ S.t.

■ Contraintes d'ordonnancement

$$\sum_{j \in V^*, J_j \neq J_i \cup i < j} \sum_{m \in M_i \cap M_j} x_{i,j,m} = 1, \forall i \in V$$

$$\sum_{i \in V^0, J_j \neq J_i \cup i < j} \sum_{m \in M_i \cap M_j} x_{i,j,m} = 1, \forall j \in V$$

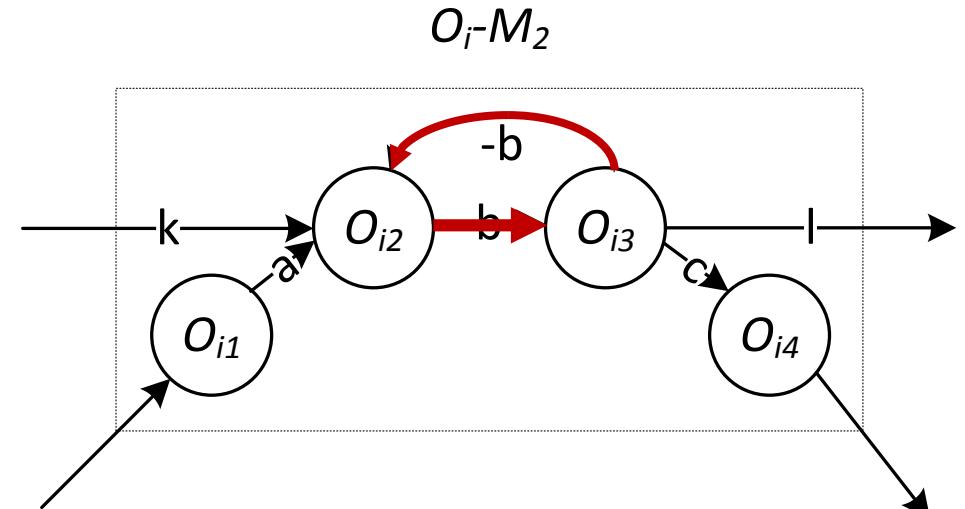
$$s_{i,l} - s_{i,k} - p_{i,k} = 0, \forall i \in V, \forall k, l \in N_i \setminus (1, |N_i|), l = k+1$$

$$s_{i,k} - s_{i,l} \geq p_{i,l}, \forall i \in V, (k, l) \in N_i, k > l$$

$$s_{j,2} - s_{i,|N_i|-1} - p_{i,|N_i|-1} \geq 0, \forall (i, j) \in V / J_i = J_j, i < j$$

$$2x_{i,j,m} + 2x_{j,i,m} \leq y_{i,m} + y_{j,m}, \forall (i, j) \in V, \forall m \in M_i \cap M_j, J_i \neq J_j \cup i < j$$

$$s_{j,1} - s_{i,|N_i|} - p_{i,|N_i|} + H(1 - x_{i,j,m}) \geq 0, \forall i, j \in V / J_i \neq J_j \cup i < j, m \in M_i \cap M_j$$



Job-shop Flexible sous contrainte énergétique: Modélisation

■ S.t.

■ Contraintes d'ordonnancement

$$\sum_{j \in V^*, J_j \neq J_i \cup i < j} \sum_{m \in M_i \cap M_j} x_{i,j,m} = 1, \forall i \in V$$

$$\sum_{i \in V^0, J_j \neq J_i \cup i < j} \sum_{m \in M_i \cap M_j} x_{i,j,m} = 1, \forall j \in V$$

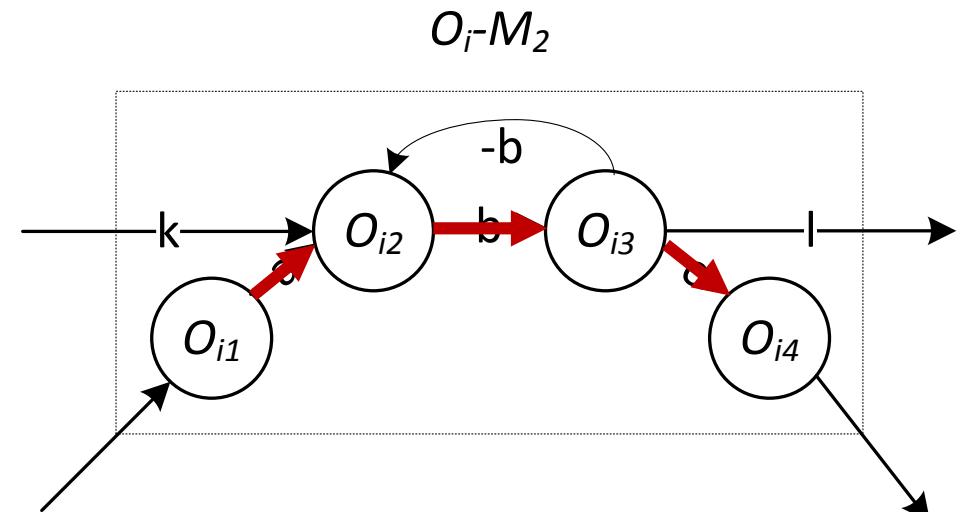
$$s_{i,l} - s_{i,k} - p_{i,k} = 0, \forall i \in V, \forall k, l \in N_i \setminus (1, |N_i|), l = k+1$$

$$s_{i,k} - s_{i,l} \geq p_{i,l}, \forall i \in V, (k, l) \in N_i, k > l$$

$$s_{j,2} - s_{i,|N_i|-1} - p_{i,|N_i|-1} \geq 0, \forall (i, j) \in V / J_i = J_j, i < j$$

$$2x_{i,j,m} + 2x_{j,i,m} \leq y_{i,m} + y_{j,m}, \forall (i, j) \in V, \forall m \in M_i \cap M_j, J_i \neq J_j \cup i < j$$

$$s_{j,1} - s_{i,|N_i|} - p_{i,|N_i|} + H(1 - x_{i,j,m}) \geq 0, \forall i, j \in V / J_i \neq J_j \cup i < j, m \in M_i \cap M_j$$



Job-shop Flexible sous contrainte énergétique: Modélisation

■ S.t.

■ Contraintes d'ordonnancement

$$\sum_{j \in V^*, J_j \neq J_i \cup i < j} \sum_{m \in M_i \cap M_j} x_{i,j,m} = 1, \forall i \in V$$

$$\sum_{i \in V^0, J_j \neq J_i \cup i < j} \sum_{m \in M_i \cap M_j} x_{i,j,m} = 1, \forall j \in V$$

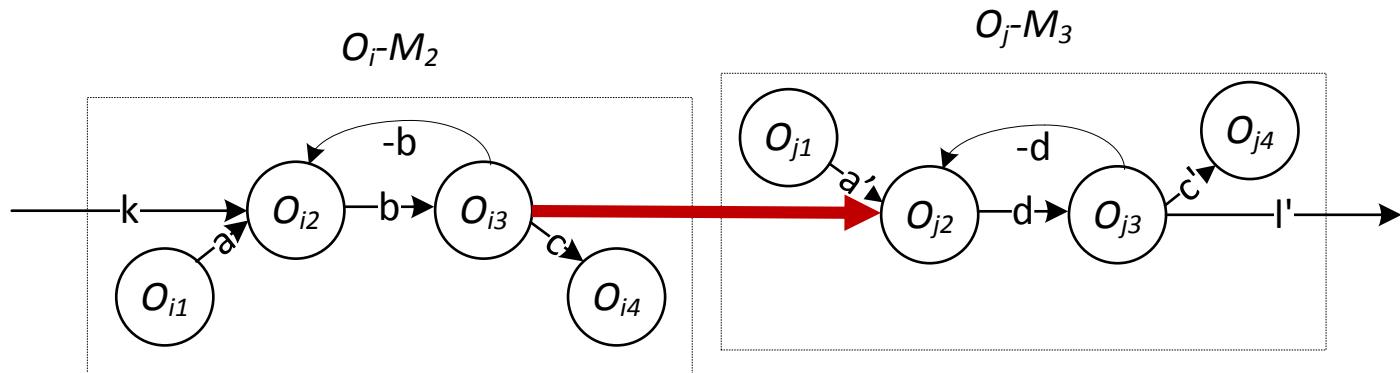
$$s_{i,l} - s_{i,k} - p_{i,k} = 0, \forall i \in V, \forall k, l \in N_i \setminus (1, |N_i|), l = k+1$$

$$s_{i,k} - s_{i,l} \geq p_{i,l}, \forall i \in V, (k, l) \in N_i, k > l$$

$$s_{j,2} - s_{i,|N_i|-1} - p_{i,|N_i|-1} \geq 0, \forall (i, j) \in V / J_i = J_j, i < j$$

$$2x_{i,j,m} + 2x_{j,i,m} \leq y_{i,m} + y_{j,m}, \forall (i, j) \in V, \forall m \in M_i \cap M_j, J_i \neq J_j \cup i < j$$

$$s_{j,1} - s_{i,|N_i|} - p_{i,|N_i|} + H(1 - x_{i,j,m}) \geq 0, \forall i, j \in V / J_i \neq J_j \cup i < j, m \in M_i \cap M_j$$



Job-shop Flexible sous contrainte énergétique: Modélisation

■ S.t.

■ Contraintes d'ordonnancement

$$\sum_{j \in V^*, J_j \neq J_i \cup i < j} \sum_{m \in M_i \cap M_j} x_{i,j,m} = 1, \forall i \in V$$

$$\sum_{i \in V^0, J_j \neq J_i \cup i < j} \sum_{m \in M_i \cap M_j} x_{i,j,m} = 1, \forall j \in V$$

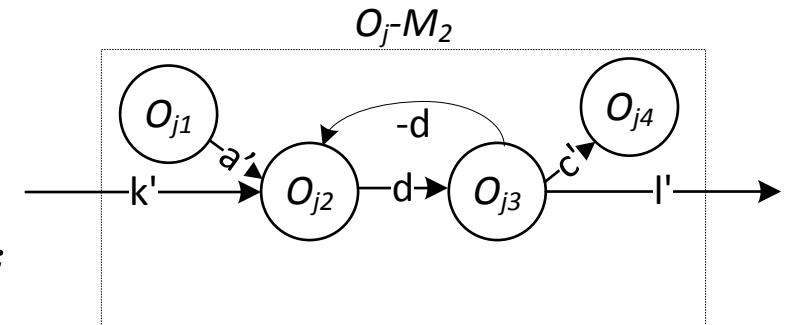
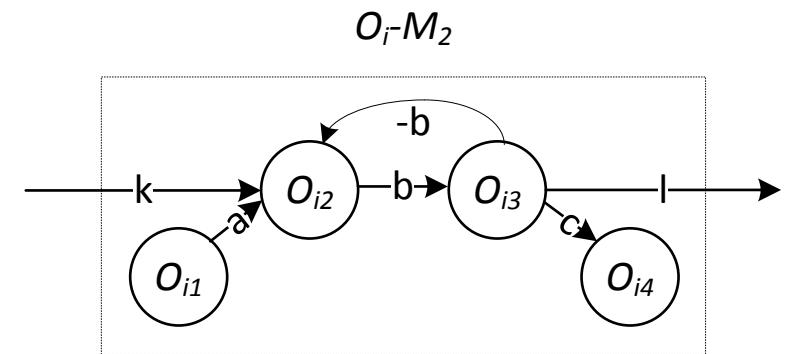
$$s_{i,l} - s_{i,k} - p_{i,k} = 0, \forall i \in V, \forall k, l \in N_i \setminus (1, |N_i|), l = k+1$$

$$s_{i,k} - s_{i,l} \geq p_{i,l}, \forall i \in V, (k, l) \in N_i, k > l$$

$$s_{j,2} - s_{i,|N_i|-1} - p_{i,|N_i|-1} \geq 0, \forall (i, j) \in V / J_i = J_j, i < j$$

$$2x_{i,j,m} + 2x_{j,i,m} \leq y_{i,m} + y_{j,m}, \forall (i, j) \in V, \forall m \in M_i \cap M_j, J_i \neq J_j \cup i < j$$

$$s_{j,1} - s_{i,|N_i|} - p_{i,|N_i|} + H(1-x_{i,j,m}) \geq 0, \forall i, j \in V / J_i \neq J_j \cup i < j, m \in M_i \cap M_j$$



Job-shop Flexible sous contrainte énergétique: Modélisation

■ S.t.

■ Contraintes d'ordonnancement

$$\sum_{j \in V^*, J_j \neq J_i \cup i < j} \sum_{m \in M_i \cap M_j} x_{i,j,m} = 1, \forall i \in V$$

$$\sum_{i \in V^0, J_j \neq J_i \cup i < j} \sum_{m \in M_i \cap M_j} x_{i,j,m} = 1, \forall j \in V$$

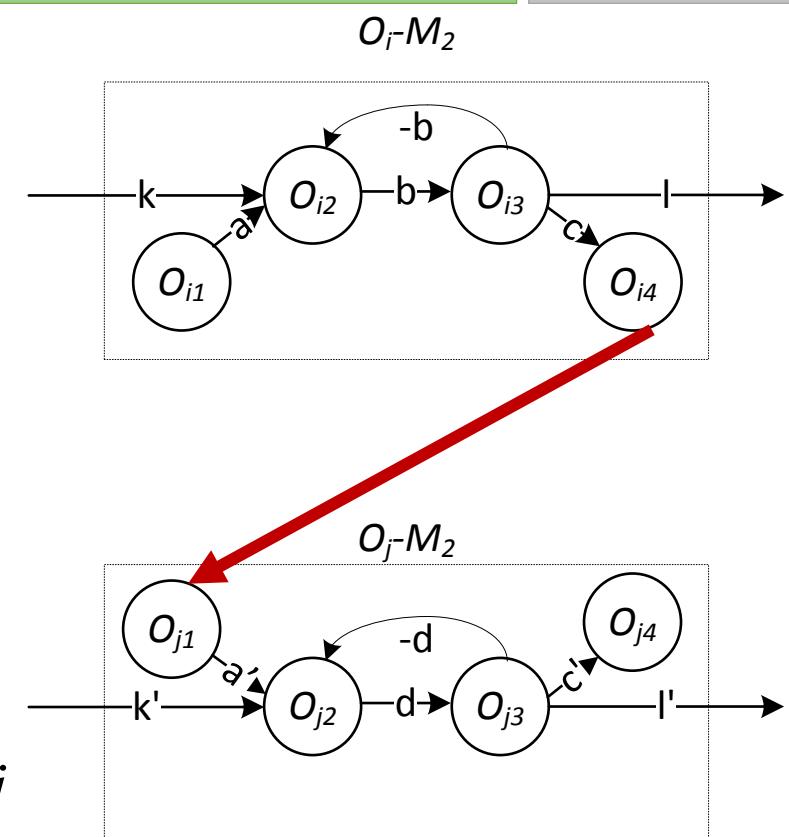
$$s_{i,l} - s_{i,k} - p_{i,k} = 0, \forall i \in V, \forall k, l \in N_i \setminus (1, |N_i|), l = k+1$$

$$s_{i,k} - s_{i,l} \geq p_{i,l}, \forall i \in V, (k, l) \in N_i, k > l$$

$$s_{j,2} - s_{i,|N_i|-1} - p_{i,|N_i|-1} \geq 0, \forall (i, j) \in V / J_i = J_j, i < j$$

$$2x_{i,j,m} + 2x_{j,i,m} \leq y_{i,m} + y_{j,m}, \forall (i, j) \in V, \forall m \in M_i \cap M_j, J_i \neq J_j \cup i < j$$

$$s_{j,1} - s_{i,|N_i|} - p_{i,|N_i|} + H(1-x_{i,j,m}) \geq 0, \forall i, j \in V / J_i \neq J_j \cup i < j, m \in M_i \cap M_j$$



Job-shop Flexible sous contrainte énergétique: Modélisation

■ S.t.

■ Contraintes d'ordonnancement

$$\sum_{j \in V^*, J_j \neq J_i \cup i < j} \sum_{m \in M_i \cap M_j} x_{i,j,m} = 1, \forall i \in V$$

$$\sum_{i \in V^0, J_j \neq J_i \cup i < j} \sum_{m \in M_i \cap M_j} x_{i,j,m} = 1, \forall j \in V$$

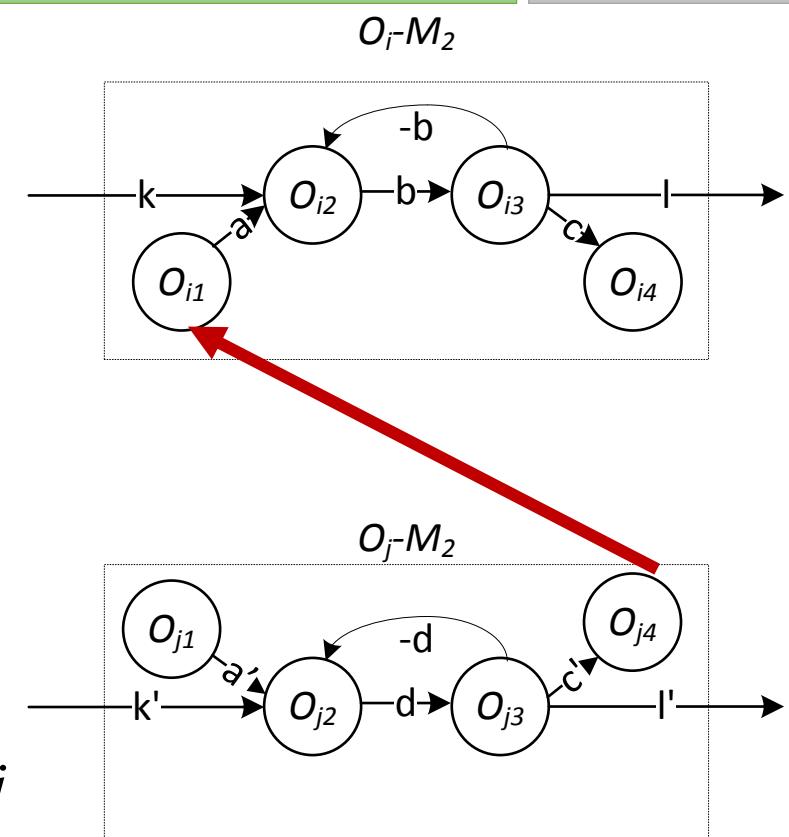
$$s_{i,l} - s_{i,k} - p_{i,k} = 0, \forall i \in V, \forall k, l \in N_i \setminus (1, |N_i|), l = k+1$$

$$s_{i,k} - s_{i,l} \geq p_{i,l}, \forall i \in V, (k, l) \in N_i, k > l$$

$$s_{j,2} - s_{i,|N_i|-1} - p_{i,|N_i|-1} \geq 0, \forall (i, j) \in V / J_i = J_j, i < j$$

$$2x_{i,j,m} + 2x_{j,i,m} \leq y_{i,m} + y_{j,m}, \forall (i, j) \in V, \forall m \in M_i \cap M_j, J_i \neq J_j \cup i < j$$

$$s_{j,1} - s_{i,|N_i|} - p_{i,|N_i|} + H(1-x_{i,j,m}) \geq 0, \forall i, j \in V / J_i \neq J_j \cup i < j, m \in M_i \cap M_j$$



Job-shop Flexible sous contrainte énergétique: Modélisation

■ S.t.

■ Contraintes d'ordonnancement

$$\sum_{j \in V^*, J_j \neq J_i \cup i < j} \sum_{m \in M_i \cap M_j} x_{i,j,m} = 1, \forall i \in V$$

$$\sum_{i \in V^0, J_j \neq J_i \cup i < j} \sum_{m \in M_i \cap M_j} x_{i,j,m} = 1, \forall j \in V$$

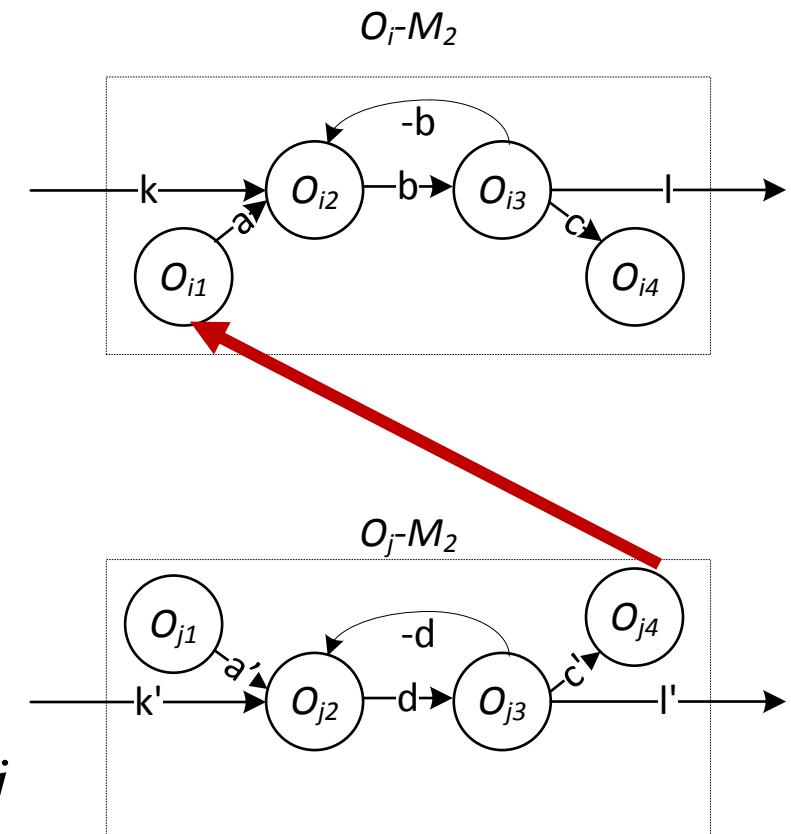
$$s_{i,l} - s_{i,k} - p_{i,k} = 0, \forall i \in V, \forall k, l \in N_i \setminus (1, |N_i|), l = k+1$$

$$s_{i,k} - s_{i,l} \geq p_{i,l}, \forall i \in V, (k, l) \in N_i, k > l$$

$$s_{j,2} - s_{i,|N_i|-1} - p_{i,|N_i|-1} \geq 0, \forall (i, j) \in V / J_i = J_j, i < j$$

$$2x_{i,j,m} + 2x_{j,i,m} \leq y_{i,m} + y_{j,m}, \forall (i, j) \in V, \forall m \in M_i \cap M_j, J_i \neq J_j \cup i < j$$

$$s_{j,1} - s_{i,|N_i|} - p_{i,|N_i|} + H(1-x_{i,j,m}) \geq 0, \forall i, j \in V / J_i \neq J_j \cup i < j, m \in M_i \cap M_j$$



Job-shop Flexible sous contrainte énergétique: Modélisation

■ S.t.

■ Contraintes de puissances

$$e_{i,k} = \sum_m y_{i,m} E_{i,k,m}, \forall i \in V, \forall k \in N / k \in N_i \setminus \{1, |N_i|\}$$

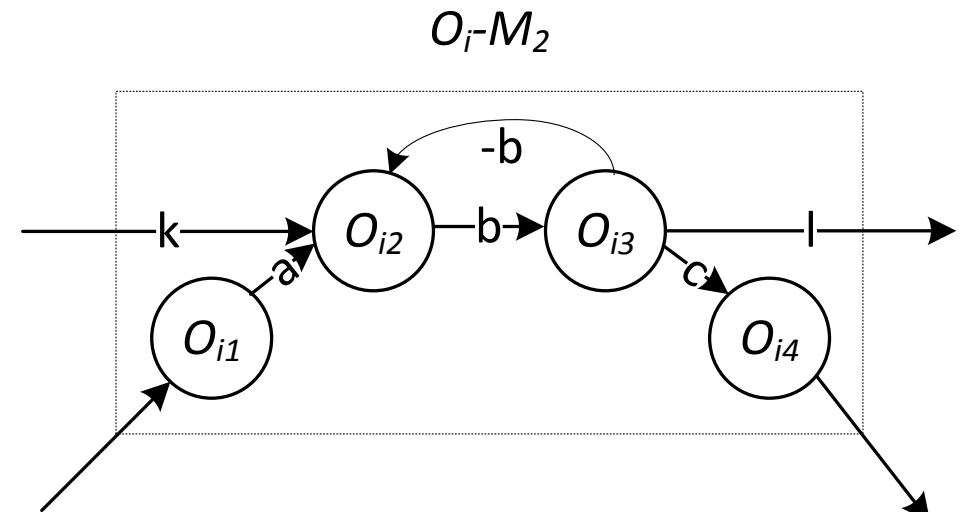
$$\sum_{j \in V, k \in N_j} \varphi_{0,1,j,k} \leq E_{\max}$$

$$\varphi_{0,0,j,l} + \sum_{i \in V} \sum_{k \in N} \varphi_{i,k,j,l} - e_{j,l} = 0, \forall j \in V, \forall l \in N_j \setminus 1$$

$$\varphi_{0,0,j,1} + \sum_{i \in V} \sum_{k \in N} \varphi_{i,k,j,1} - e_{j,1} - e^b_{j,1} = 0, \forall j \in V$$

$$\sum_{j \in V} \sum_{l \in N} \varphi_{i,k,j,l} - e_{i,k} \leq 0, \forall i \in V, \forall k \in N \setminus |N_i|$$

$$\sum_{j \in V} \sum_{l \in N} \varphi_{i,|N_i|,j,l} - e_{i,|N_i|} - e^b_{i,|N_i|} \leq 0, \forall i \in V$$



Job-shop Flexible sous contrainte énergétique: Modélisation

■ S.t.

■ Contraintes de puissances

$$e_{i,k} = \sum_m y_{i,m} E_{i,k,m}, \forall i \in V, \forall k \in N / k \in N_i \setminus \{1, |N_i|\}$$

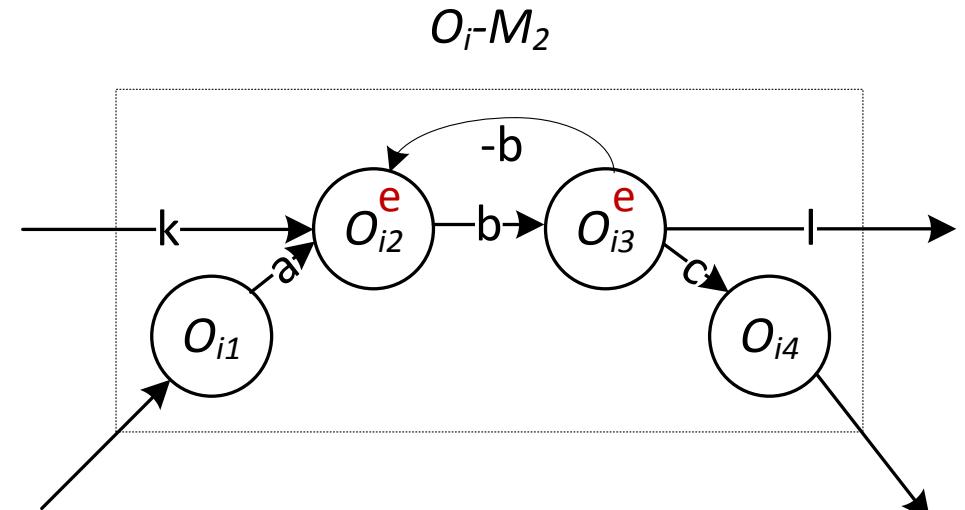
$$\sum_{j \in V, k \in N_j} \varphi_{0,1,j,k} \leq E_{\max}$$

$$\varphi_{0,0,j,l} + \sum_{i \in V} \sum_{k \in N} \varphi_{i,k,j,l} - e_{j,l} = 0, \forall j \in V, \forall l \in N_j \setminus 1$$

$$\varphi_{0,0,j,1} + \sum_{i \in V} \sum_{k \in N} \varphi_{i,k,j,1} - e_{j,1} - e^b_{j,1} = 0, \forall j \in V$$

$$\sum_{j \in V} \sum_{l \in N} \varphi_{i,k,j,l} - e_{i,k} \leq 0, \forall i \in V, \forall k \in N \setminus |N_i|$$

$$\sum_{j \in V} \sum_{l \in N} \varphi_{i,|N_i|,j,l} - e_{i,|N_i|} - e^b_{i,|N_i|} \leq 0, \forall i \in V$$



Job-shop Flexible sous contrainte énergétique: Modélisation

■ S.t.

■ Contraintes de puissances

$$e_{i,k} = \sum_m y_{i,m} E_{i,k,m}, \forall i \in V, \forall k \in N / k \in N_i \setminus \{1, |N_i|\}$$

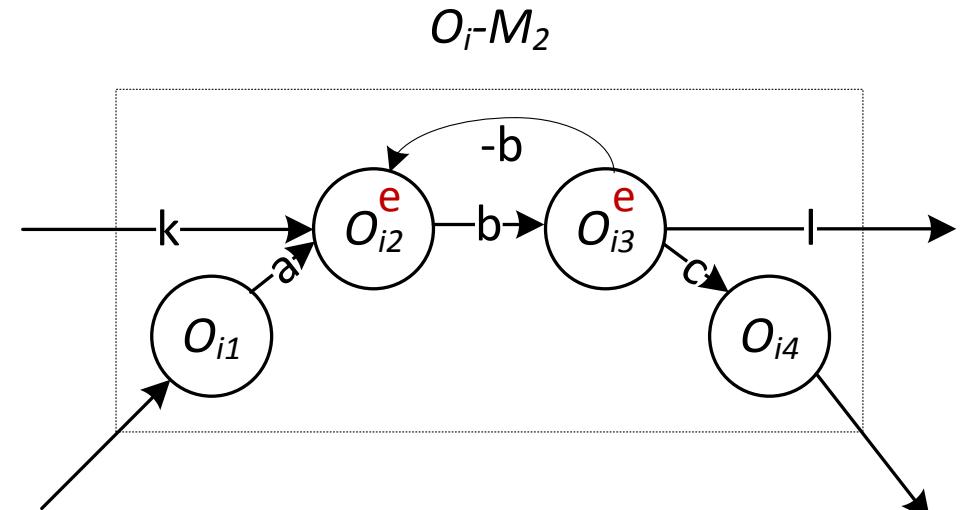
$$\sum_{j \in V, k \in N_j} \varphi_{0,1,j,k} \leq E_{\max}$$

$$\varphi_{0,0,j,l} + \sum_{i \in V} \sum_{k \in N} \varphi_{i,k,j,l} - e_{j,l} = 0, \forall j \in V, \forall l \in N_j \setminus 1$$

$$\varphi_{0,0,j,1} + \sum_{i \in V} \sum_{k \in N} \varphi_{i,k,j,1} - e_{j,1} - e^b_{j,1} = 0, \forall j \in V$$

$$\sum_{j \in V} \sum_{l \in N} \varphi_{i,k,j,l} - e_{i,k} \leq 0, \forall i \in V, \forall k \in N \setminus |N_i|$$

$$\sum_{j \in V} \sum_{l \in N} \varphi_{i,|N_i|,j,l} - e_{i,|N_i|} - e^b_{i,|N_i|} \leq 0, \forall i \in V$$



Job-shop Flexible sous contrainte énergétique: Modélisation

■ S.t.

■ Contraintes de puissances

$$e_{i,k} = \sum_m y_{i,m} E_{i,k,m}, \forall i \in V, \forall k \in N / k \in N_i \setminus \{1, |N_i|\}$$

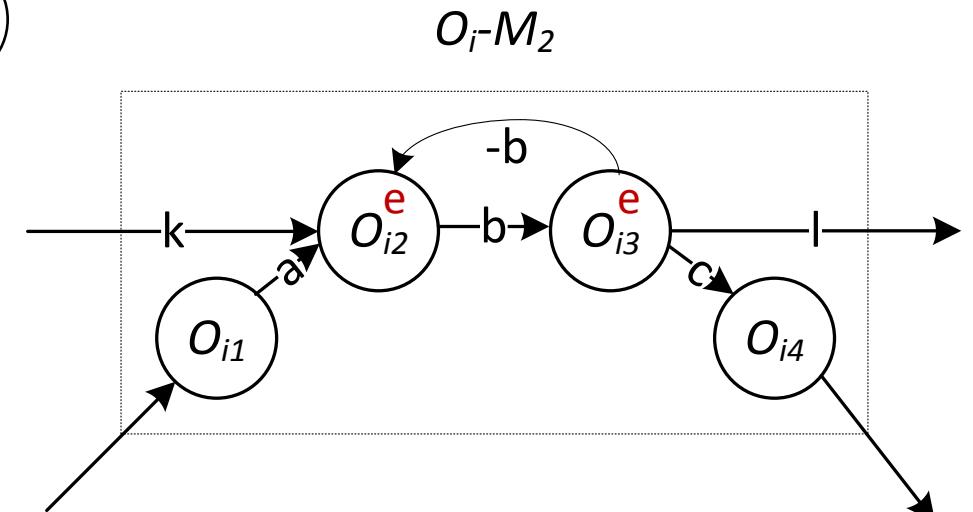
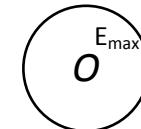
$$\sum_{j \in V, k \in N_j} \varphi_{0,1,j,k} \leq E_{\max}$$

$$\varphi_{0,0,j,l} + \sum_{i \in V} \sum_{k \in N} \varphi_{i,k,j,l} - e_{j,l} = 0, \forall j \in V, \forall l \in N_j \setminus 1$$

$$\varphi_{0,0,j,1} + \sum_{i \in V} \sum_{k \in N} \varphi_{i,k,j,1} - e_{j,1} - e^b_{j,1} = 0, \forall j \in V$$

$$\sum_{j \in V} \sum_{l \in N} \varphi_{i,k,j,l} - e_{i,k} \leq 0, \forall i \in V, \forall k \in N \setminus |N_i|$$

$$\sum_{j \in V} \sum_{l \in N} \varphi_{i,|N_i|,j,l} - e_{i,|N_i|} - e^b_{i,|N_i|} \leq 0, \forall i \in V$$



Job-shop Flexible sous contrainte énergétique: Modélisation

■ S.t.

■ Contraintes de puissances

$$e_{i,k} = \sum_m y_{i,m} E_{i,k,m}, \forall i \in V, \forall k \in N / k \in N_i \setminus \{1, |N_i|\}$$

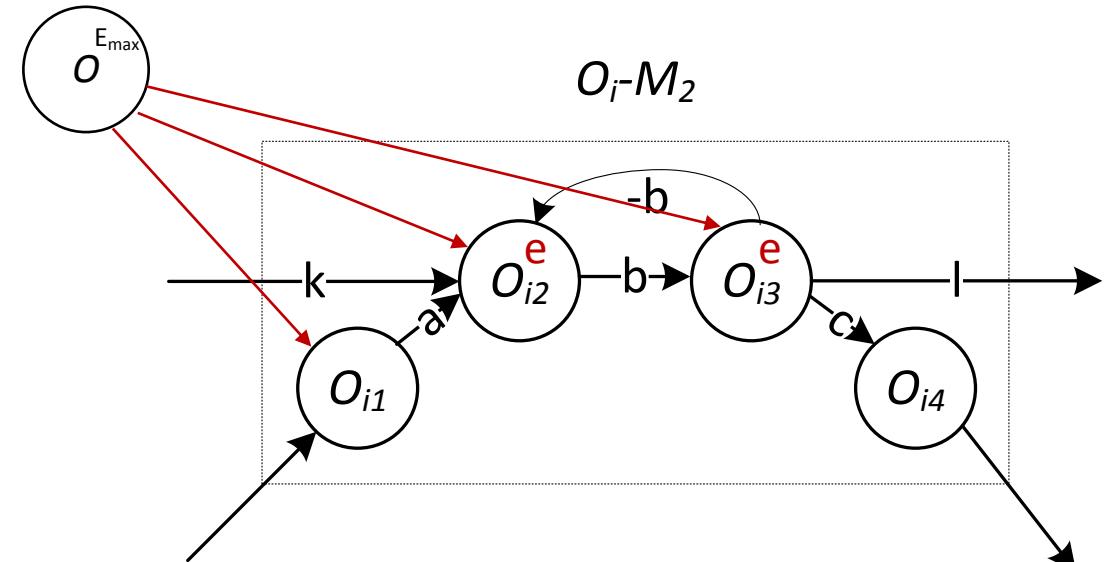
$$\sum_{j \in V, k \in N_j} \varphi_{0,1,j,k} \leq E_{\max}$$

$$\varphi_{0,0,j,l} + \sum_{i \in V} \sum_{k \in N} \varphi_{i,k,j,l} - e_{j,l} = 0, \forall j \in V, \forall l \in N_j \setminus 1$$

$$\varphi_{0,0,j,1} + \sum_{i \in V} \sum_{k \in N} \varphi_{i,k,j,1} - e_{j,1} - e^b_{j,1} = 0, \forall j \in V$$

$$\sum_{j \in V} \sum_{l \in N} \varphi_{i,k,j,l} - e_{i,k} \leq 0, \forall i \in V, \forall k \in N \setminus |N_i|$$

$$\sum_{j \in V} \sum_{l \in N} \varphi_{i,|N_i|,j,l} - e_{i,|N_i|} - e^b_{i,|N_i|} \leq 0, \forall i \in V$$



Job-shop Flexible sous contrainte énergétique: Modélisation

■ S.t.

■ Contraintes de puissances

$$e_{i,k} = \sum_m y_{i,m} E_{i,k,m}, \forall i \in V, \forall k \in N / k \in N_i \setminus \{1, |N_i|\}$$

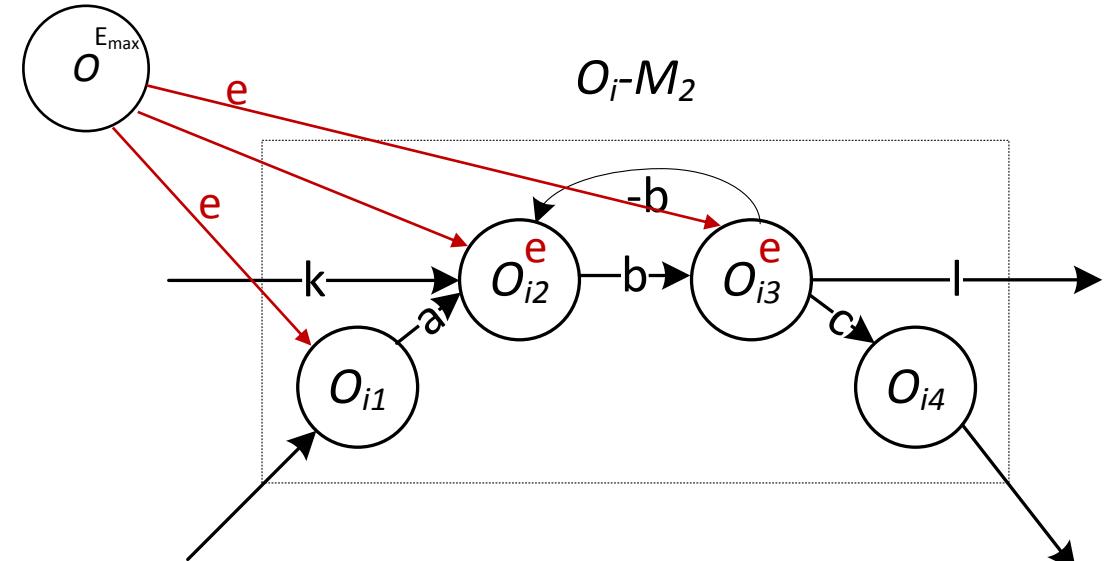
$$\sum_{j \in V, k \in N_j} \varphi_{0,1,j,k} \leq E_{\max}$$

$$\varphi_{0,0,j,l} + \sum_{i \in V} \sum_{k \in N} \varphi_{i,k,j,l} - e_{j,l} = 0, \forall j \in V, \forall l \in N_j \setminus 1$$

$$\varphi_{0,0,j,1} + \sum_{i \in V} \sum_{k \in N} \varphi_{i,k,j,1} - e_{j,1} - e^b_{j,1} = 0, \forall j \in V$$

$$\sum_{j \in V} \sum_{l \in N} \varphi_{i,k,j,l} - e_{i,k} \leq 0, \forall i \in V, \forall k \in N \setminus |N_i|$$

$$\sum_{j \in V} \sum_{l \in N} \varphi_{i,|N_i|,j,l} - e_{i,|N_i|} - e^b_{i,|N_i|} \leq 0, \forall i \in V$$



Job-shop Flexible sous contrainte énergétique: Modélisation

■ S.t.

■ Contraintes de puissances

$$e_{i,k} = \sum_m y_{i,m} E_{i,k,m}, \forall i \in V, \forall k \in N / k \in N_i \setminus \{1, |N_i|\}$$

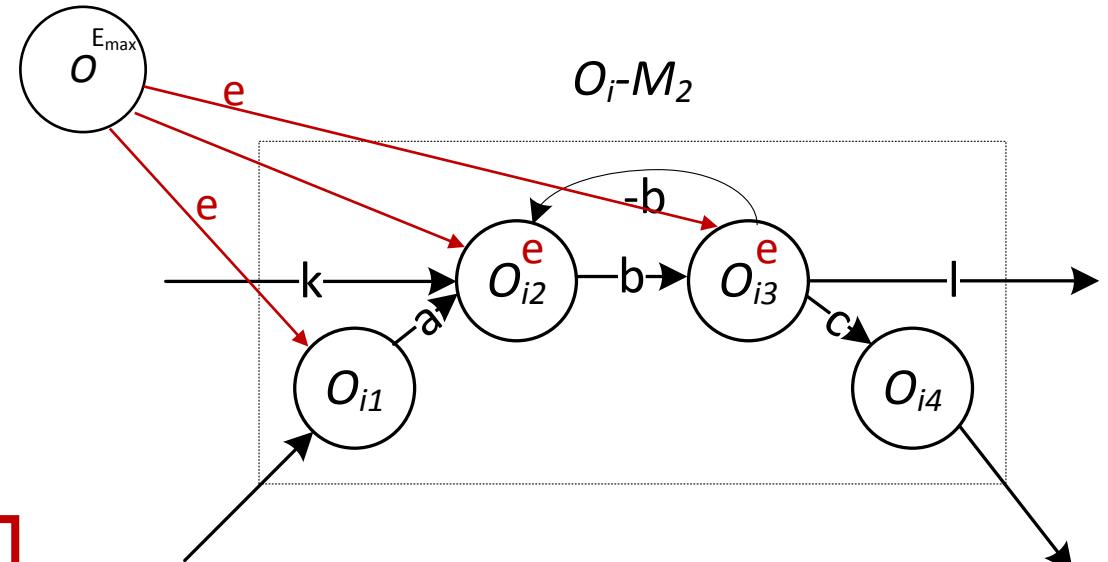
$$\sum_{j \in V, k \in N_j} \varphi_{0,1,j,k} \leq E_{\max}$$

$$\varphi_{0,0,j,l} + \sum_{i \in V} \sum_{k \in N} \varphi_{i,k,j,l} - e_{j,l} = 0, \forall j \in V, \forall l \in N_j \setminus 1$$

$$\varphi_{0,0,j,1} + \sum_{i \in V} \sum_{k \in N} \varphi_{i,k,j,1} - e_{j,1} - e^b_{j,1} = 0, \forall j \in V$$

$$\sum_{j \in V} \sum_{l \in N} \varphi_{i,k,j,l} - e_{i,k} \leq 0, \forall i \in V, \forall k \in N \setminus |N_i|$$

$$\sum_{j \in V} \sum_{l \in N} \varphi_{i,|N_i|,j,l} - e_{i,|N_i|} - e^b_{i,|N_i|} \leq 0, \forall i \in V$$



Job-shop Flexible sous contrainte énergétique: Modélisation

■ S.t.

■ Contraintes de puissances

$$e_{i,k} = \sum_m y_{i,m} E_{i,k,m}, \forall i \in V, \forall k \in N / k \in N_i \setminus \{1, |N_i|\}$$

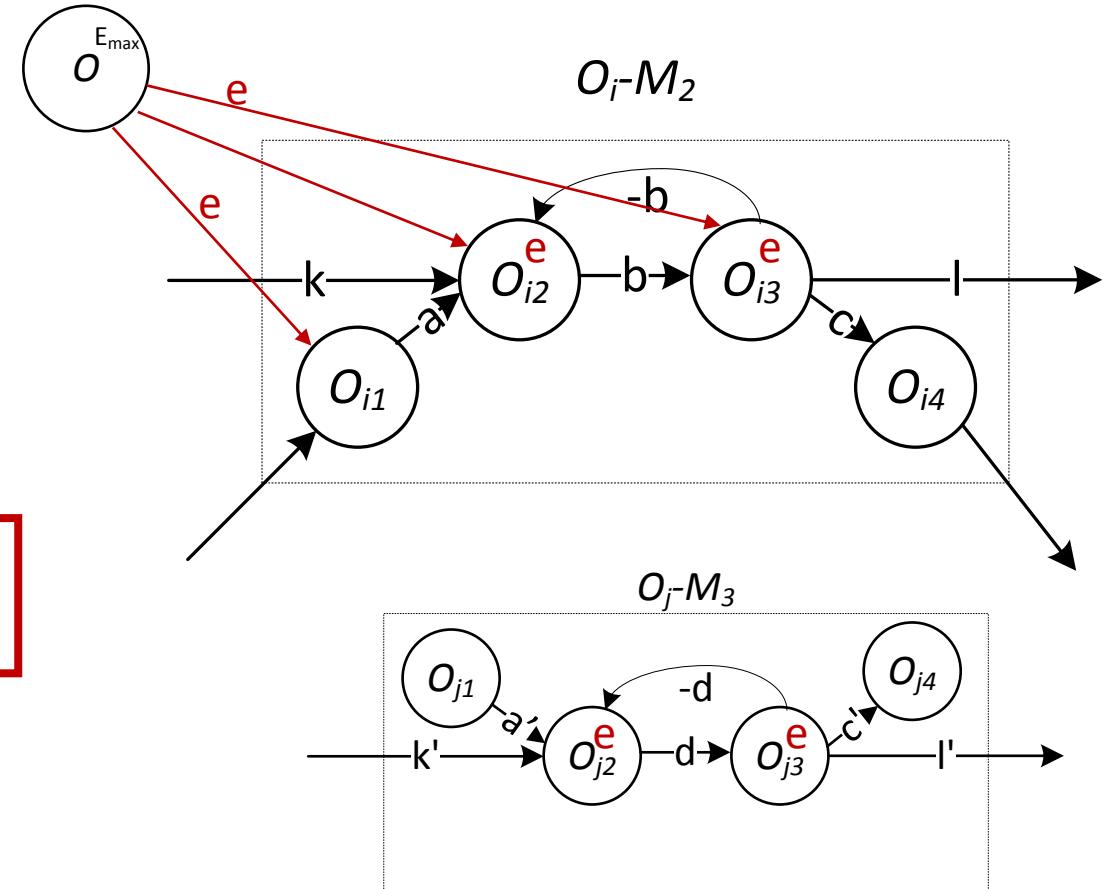
$$\sum_{j \in V, k \in N_j} \varphi_{0,1,j,k} \leq E_{\max}$$

$$\varphi_{0,0,j,l} + \sum_{i \in V} \sum_{k \in N} \varphi_{i,k,j,l} - e_{j,l} = 0, \forall j \in V, \forall l \in N_j \setminus 1$$

$$\varphi_{0,0,j,1} + \sum_{i \in V} \sum_{k \in N} \varphi_{i,k,j,1} - e_{j,1} - e^b_{j,1} = 0, \forall j \in V$$

$$\sum_{j \in V} \sum_{l \in N} \varphi_{i,k,j,l} - e_{i,k} \leq 0, \forall i \in V, \forall k \in N \setminus |N_i|$$

$$\sum_{j \in V} \sum_{l \in N} \varphi_{i,|N_i|,j,l} - e_{i,|N_i|} - e^b_{i,|N_i|} \leq 0, \forall i \in V$$



Job-shop Flexible sous contrainte énergétique: Modélisation

■ S.t.

■ Contraintes de puissances

$$e_{i,k} = \sum_m y_{i,m} E_{i,k,m}, \forall i \in V, \forall k \in N / k \in N_i \setminus \{1, |N_i|\}$$

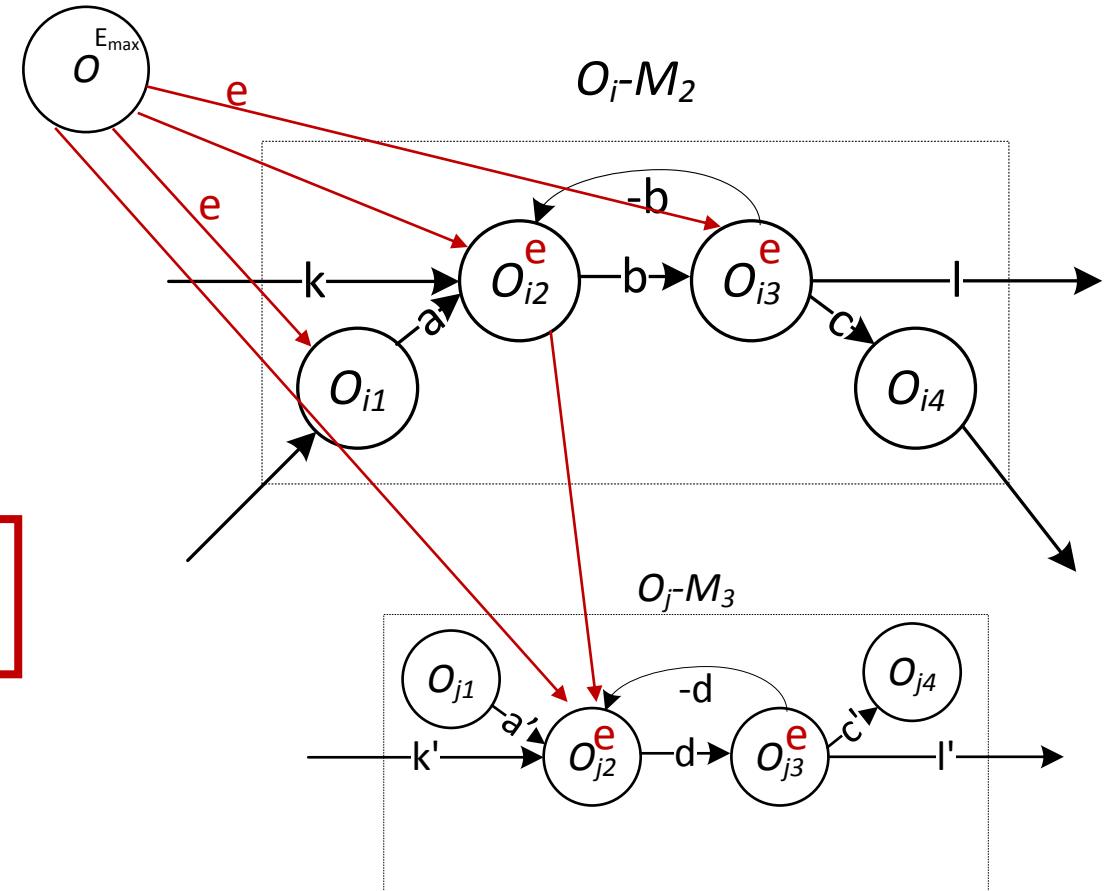
$$\sum_{j \in V, k \in N_j} \varphi_{0,1,j,k} \leq E_{\max}$$

$$\varphi_{0,0,j,l} + \sum_{i \in V} \sum_{k \in N} \varphi_{i,k,j,l} - e_{j,l} = 0, \forall j \in V, \forall l \in N_j \setminus 1$$

$$\varphi_{0,0,j,1} + \sum_{i \in V} \sum_{k \in N} \varphi_{i,k,j,1} - e_{j,1} - e^b_{j,1} = 0, \forall j \in V$$

$$\sum_{j \in V} \sum_{l \in N} \varphi_{i,k,j,l} - e_{i,k} \leq 0, \forall i \in V, \forall k \in N \setminus |N_i|$$

$$\sum_{j \in V} \sum_{l \in N} \varphi_{i,|N_i|,j,l} - e_{i,|N_i|} - e^b_{i,|N_i|} \leq 0, \forall i \in V$$



Job-shop Flexible sous contrainte énergétique: Modélisation

■ S.t.

■ Contraintes de puissances

$$e_{i,k} = \sum_m y_{i,m} E_{i,k,m}, \forall i \in V, \forall k \in N / k \in N_i \setminus \{1, |N_i|\}$$

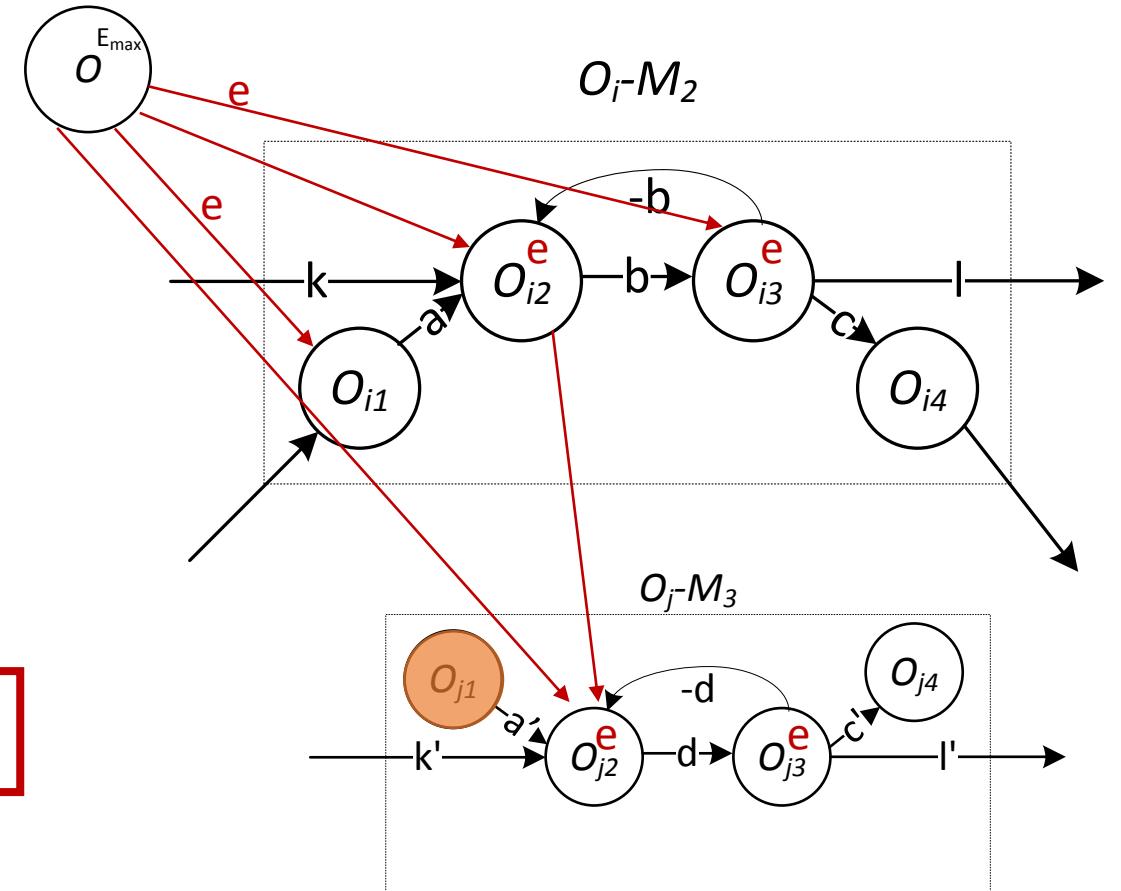
$$\sum_{j \in V, k \in N_j} \varphi_{0,1,j,k} \leq E_{\max}$$

$$\varphi_{0,0,j,l} + \sum_{i \in V} \sum_{k \in N} \varphi_{i,k,j,l} - e_{j,l} = 0, \forall j \in V, \forall l \in N_j \setminus 1$$

$$\varphi_{0,0,j,1} + \sum_{i \in V} \sum_{k \in N} \varphi_{i,k,j,1} - e_{j,1} - e_{j,1}^b = 0, \forall j \in V$$

$$\sum_{j \in V} \sum_{l \in N} \varphi_{i,k,j,l} - e_{i,k} \leq 0, \forall i \in V, \forall k \in N \setminus |N_i|$$

$$\sum_{j \in V} \sum_{l \in N} \varphi_{i,|N_i|,j,l} - e_{i,|N_i|} - e_{i,|N_i|}^b \leq 0, \forall i \in V$$



Job-shop Flexible sous contrainte énergétique: Modélisation

■ S.t.

■ Contraintes de puissances

$$e_{i,k} = \sum_m y_{i,m} E_{i,k,m}, \forall i \in V, \forall k \in N / k \in N_i \setminus \{1, |N_i|\}$$

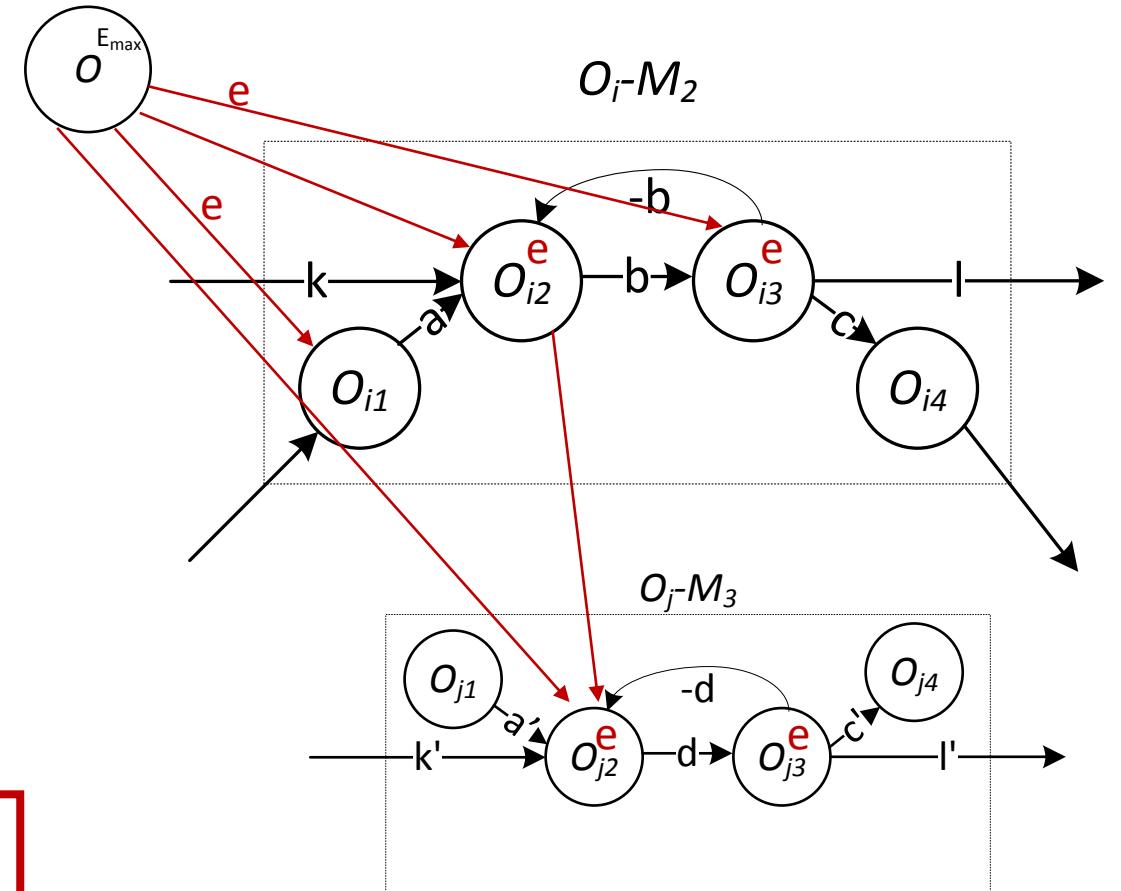
$$\sum_{j \in V, k \in N_j} \varphi_{0,1,j,k} \leq E_{\max}$$

$$\varphi_{0,0,j,l} + \sum_{i \in V} \sum_{k \in N} \varphi_{i,k,j,l} - e_{j,l} = 0, \forall j \in V, \forall l \in N_j \setminus 1$$

$$\varphi_{0,0,j,1} + \sum_{i \in V} \sum_{k \in N} \varphi_{i,k,j,1} - e_{j,1} - e^b_{j,1} = 0, \forall j \in V$$

$$\sum_{j \in V} \sum_{l \in N} \varphi_{i,k,j,l} - e_{i,k} \leq 0, \forall i \in V, \forall k \in N \setminus |N_i|$$

$$\sum_{j \in V} \sum_{l \in N} \varphi_{i,|N_i|,j,l} - e_{i,|N_i|} - e^b_{i,|N_i|} \leq 0, \forall i \in V$$



Job-shop Flexible sous contrainte énergétique: Modélisation

■ S.t.

■ Contraintes de puissances

$$e_{i,k} = \sum_m y_{i,m} E_{i,k,m}, \forall i \in V, \forall k \in N / k \in N_i \setminus \{1, |N_i|\}$$

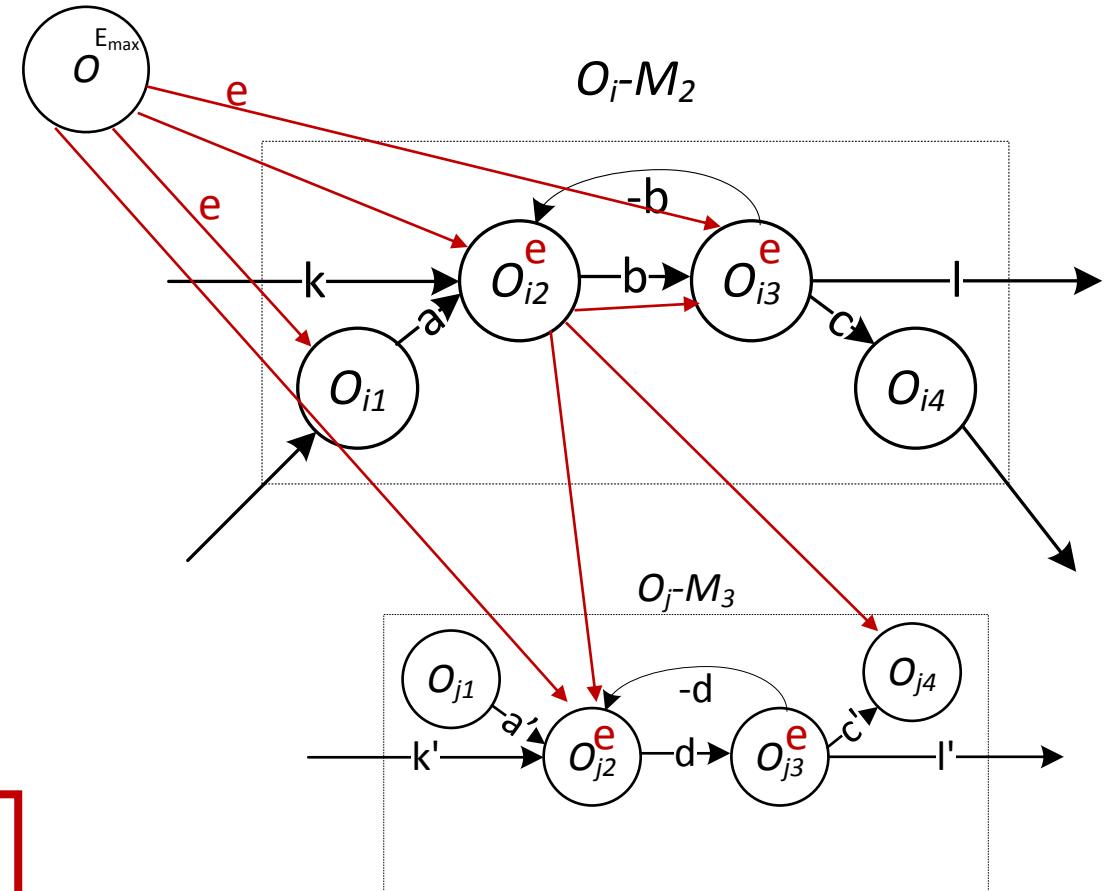
$$\sum_{j \in V, k \in N_j} \varphi_{0,1,j,k} \leq E_{\max}$$

$$\varphi_{0,0,j,l} + \sum_{i \in V} \sum_{k \in N} \varphi_{i,k,j,l} - e_{j,l} = 0, \forall j \in V, \forall l \in N_j \setminus 1$$

$$\varphi_{0,0,j,1} + \sum_{i \in V} \sum_{k \in N} \varphi_{i,k,j,1} - e_{j,1} - e^b_{j,1} = 0, \forall j \in V$$

$$\sum_{j \in V} \sum_{l \in N} \varphi_{i,k,j,l} - e_{i,k} \leq 0, \forall i \in V, \forall k \in N \setminus |N_i|$$

$$\sum_{j \in V} \sum_{l \in N} \varphi_{i,|N_i|,j,l} - e_{i,|N_i|} - e^b_{i,|N_i|} \leq 0, \forall i \in V$$



Job-shop Flexible sous contrainte énergétique: Modélisation

■ S.t.

■ Contraintes de puissances

$$e_{i,k} = \sum_m y_{i,m} E_{i,k,m}, \forall i \in V, \forall k \in N / k \in N_i \setminus \{1, |N_i|\}$$

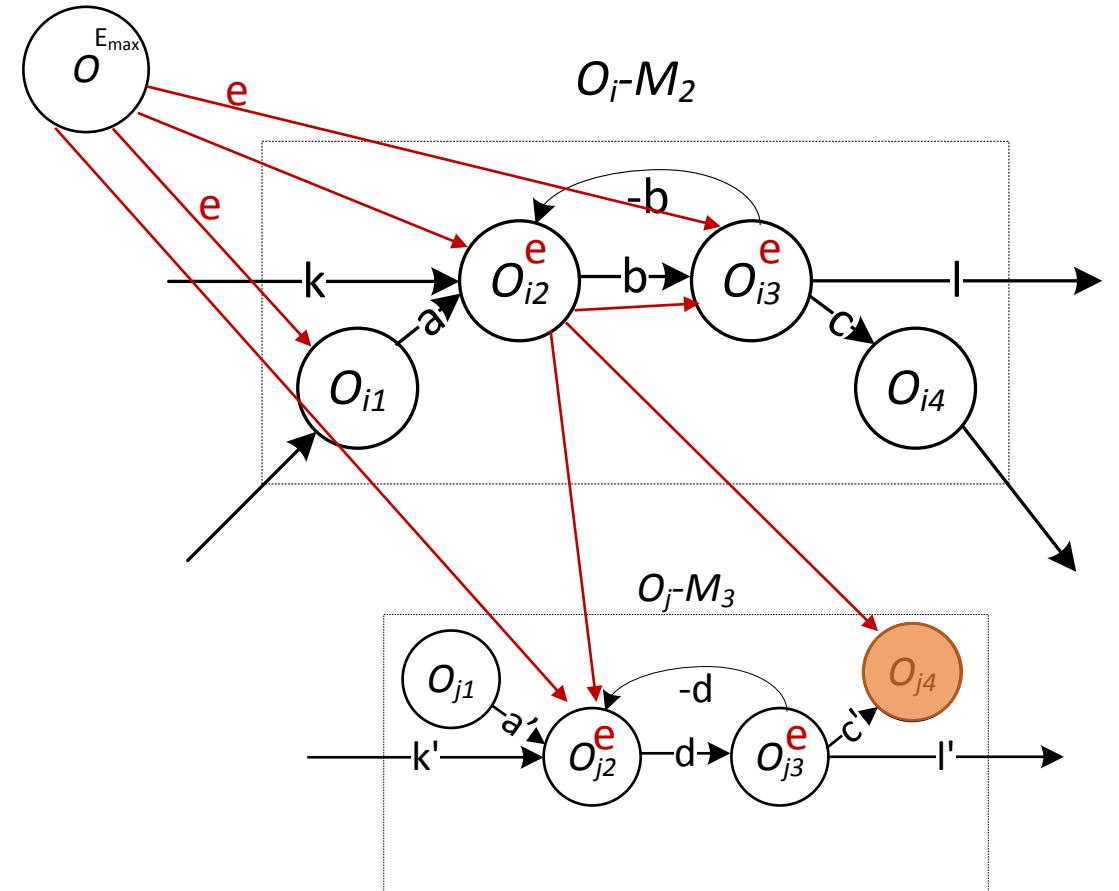
$$\sum_{j \in V, k \in N_j} \varphi_{0,1,j,k} \leq E_{\max}$$

$$\varphi_{0,0,j,l} + \sum_{i \in V} \sum_{k \in N} \varphi_{i,k,j,l} - e_{j,l} = 0, \forall j \in V, \forall l \in N_j \setminus 1$$

$$\varphi_{0,0,j,1} + \sum_{i \in V} \sum_{k \in N} \varphi_{i,k,j,1} - e_{j,1} - e^b_{j,1} = 0, \forall j \in V$$

$$\sum_{j \in V} \sum_{l \in N} \varphi_{i,k,j,l} - e_{i,k} \leq 0, \forall i \in V, \forall k \in N \setminus |N_i|$$

$$\sum_{j \in V} \sum_{l \in N} \varphi_{i,|N_i|,j,l} - e_{i,|N_i|} - e^b_{i,|N_i|} \leq 0, \forall i \in V$$



Job-shop Flexible sous contrainte énergétique: Modélisation

■ S.t.

■ Contraintes de puissances

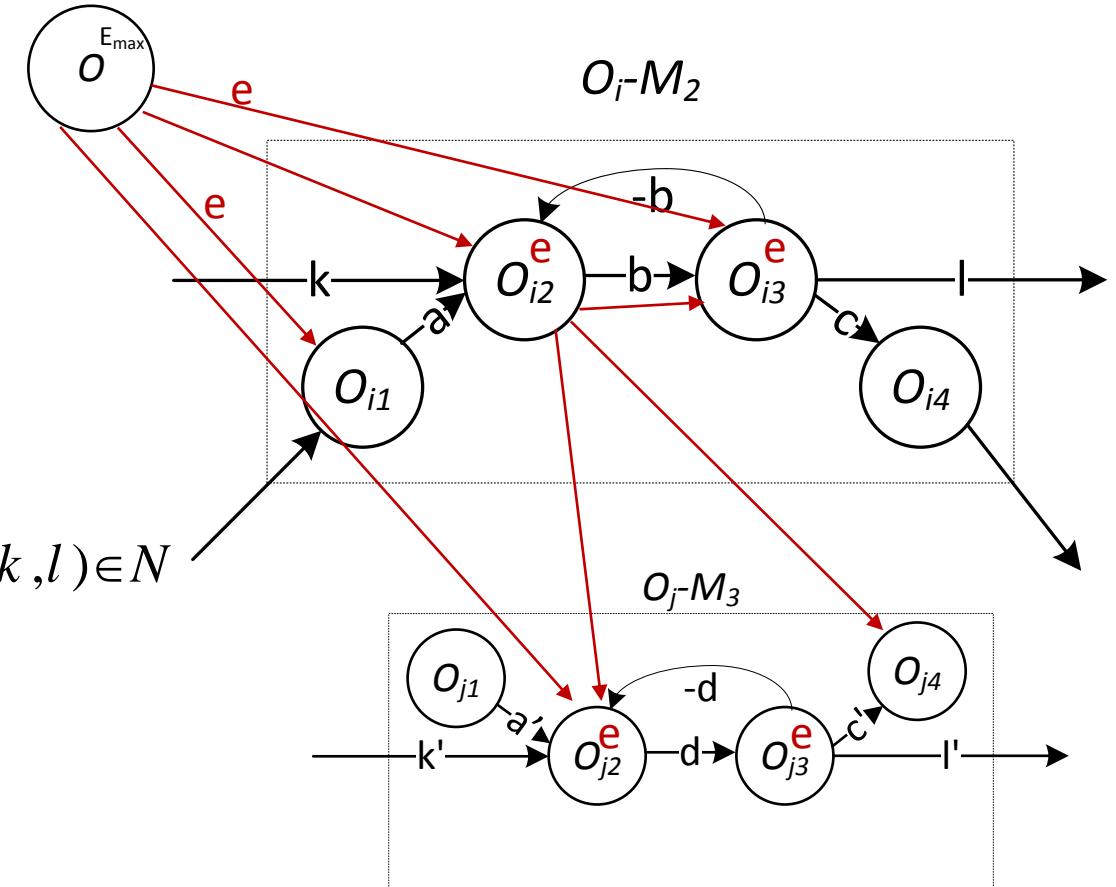
$$\varphi_{i,k,j,l} \leq H \cdot z_{i,k,j,l}, \forall i, j \in V, \forall k, l \in N$$

$$z_{i,k,j,l} \leq \varphi_{i,k,j,l}, \forall i, j \in V, \forall k, l \in N$$

$$s_{j,l} - s_{i,k} - Hz_{i,k,j,l} \geq p_{i,k} - H, \forall (i, j) \in V, \forall (k, l) \in N$$

$$z_{i,k,j,l} = 0, \forall (i, j) \in V, \forall k \in N_i, \forall l \in N_j,$$

$$J_i = J_j, (j < i) \vee (j = i \wedge l < k)$$



Job-shop Flexible sous contrainte énergétique: Modélisation

■ S.t.

■ Contraintes de puissances

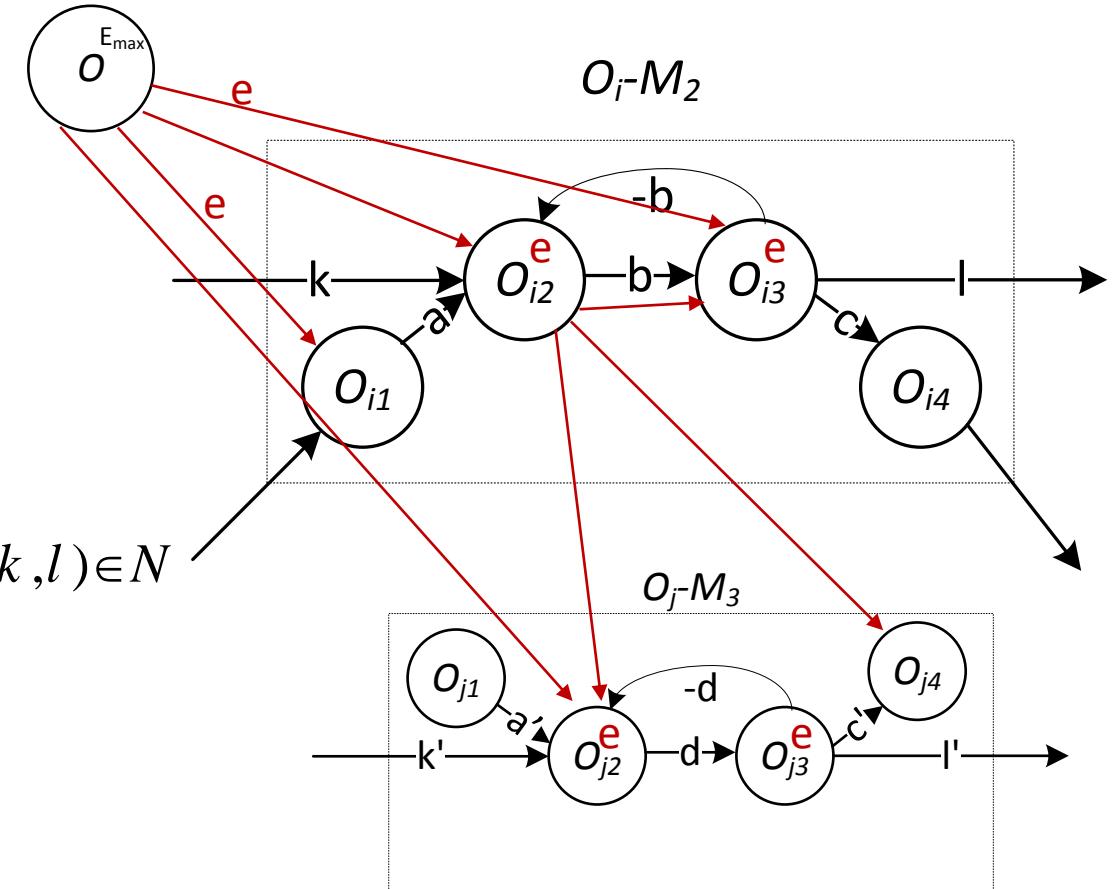
$$\varphi_{i,k,j,l} \leq H \cdot z_{i,k,j,l}, \forall i, j \in V, \forall k, l \in N$$

$$z_{i,k,j,l} \leq \varphi_{i,k,j,l}, \forall i, j \in V, \forall k, l \in N$$

$$s_{j,l} - s_{i,k} - Hz_{i,k,j,l} \geq p_{i,k} - H, \forall (i, j) \in V, \forall (k, l) \in N$$

$$z_{i,k,j,l} = 0, \forall (i, j) \in V, \forall k \in N_i, \forall l \in N_j,$$

$$J_i = J_j, (j < i) \vee (j = i \wedge l < k)$$



Job-shop Flexible sous contrainte énergétique: Modélisation

■ S.t.

■ Contraintes de puissances

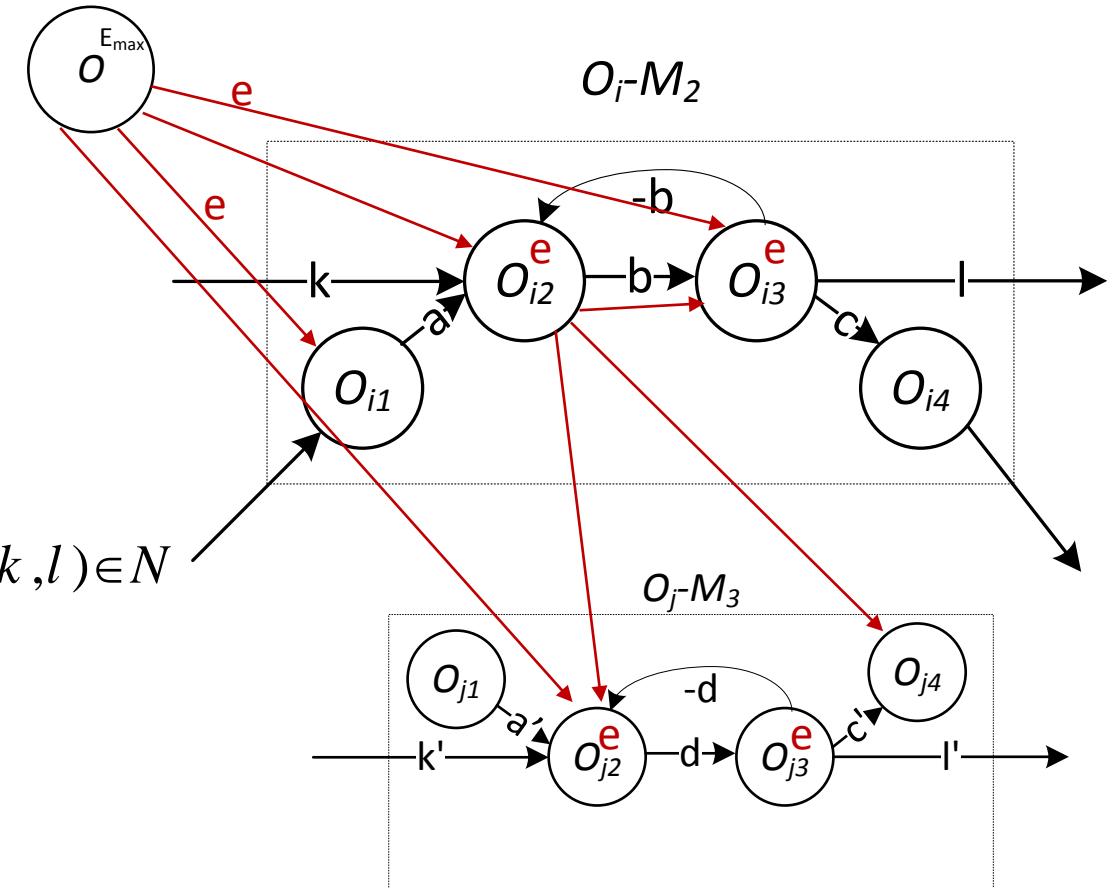
$$\varphi_{i,k,j,l} \leq H \cdot z_{i,k,j,l}, \forall i, j \in V, \forall k, l \in N$$

$$z_{i,k,j,l} \leq \varphi_{i,k,j,l}, \forall i, j \in V, \forall k, l \in N$$

$$s_{j,l} - s_{i,k} - Hz_{i,k,j,l} \geq p_{i,k} - H, \forall (i, j) \in V, \forall (k, l) \in N$$

$$z_{i,k,j,l} = 0, \forall (i, j) \in V, \forall k \in N_i, \forall l \in N_j,$$

$$J_i = J_j, (j < i) \vee (j = i \wedge l < k)$$



Job-shop Flexible sous contrainte énergétique: Modélisation

■ S.t.

■ Contraintes de puissances

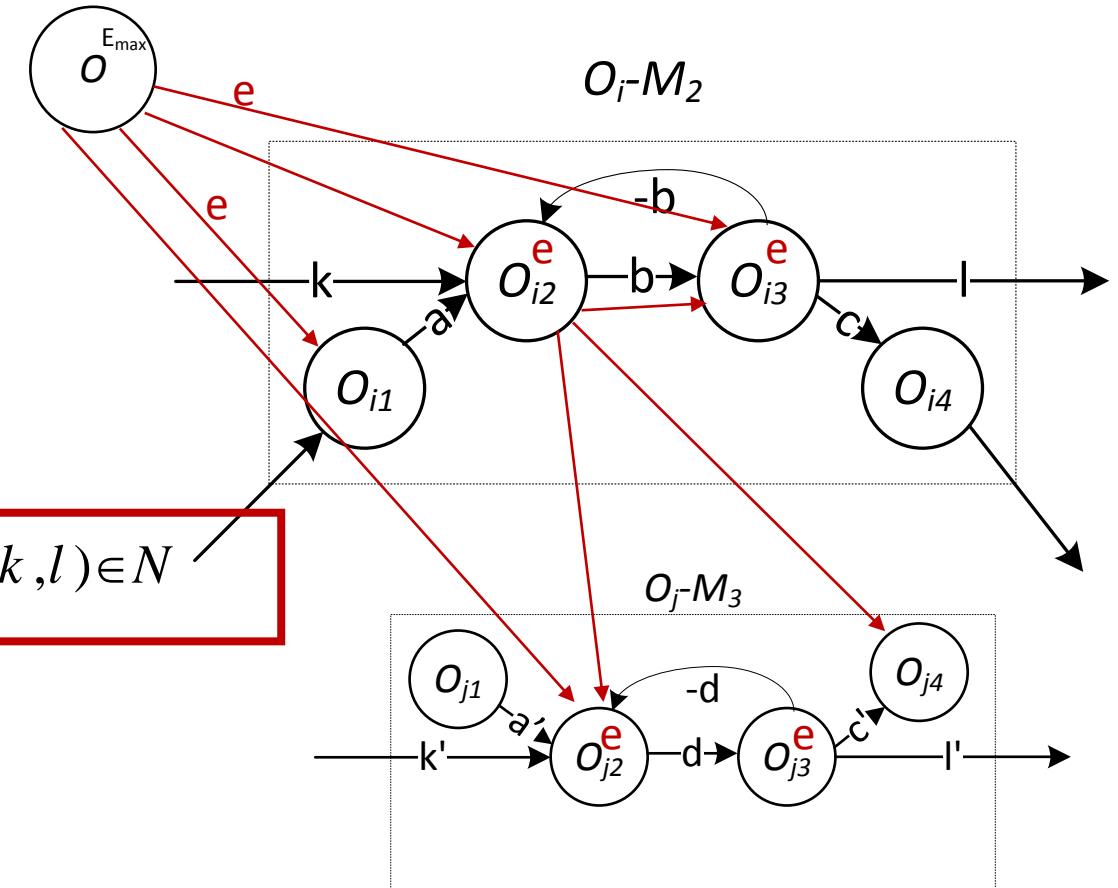
$$\varphi_{i,k,j,l} \leq H \cdot z_{i,k,j,l}, \forall i, j \in V, \forall k, l \in N$$

$$z_{i,k,j,l} \leq \varphi_{i,k,j,l}, \forall i, j \in V, \forall k, l \in N$$

$$s_{j,l} - s_{i,k} - Hz_{i,k,j,l} \geq p_{i,k} - H, \forall (i, j) \in V, \forall (k, l) \in N$$

$$z_{i,k,j,l} = 0, \forall (i, j) \in V, \forall k \in N_i, \forall l \in N_j,$$

$$J_i = J_j, (j < i) \vee (j = i \wedge l < k)$$



Job-shop Flexible sous contrainte énergétique: Modélisation

■ S.t.

■ Contraintes de puissances

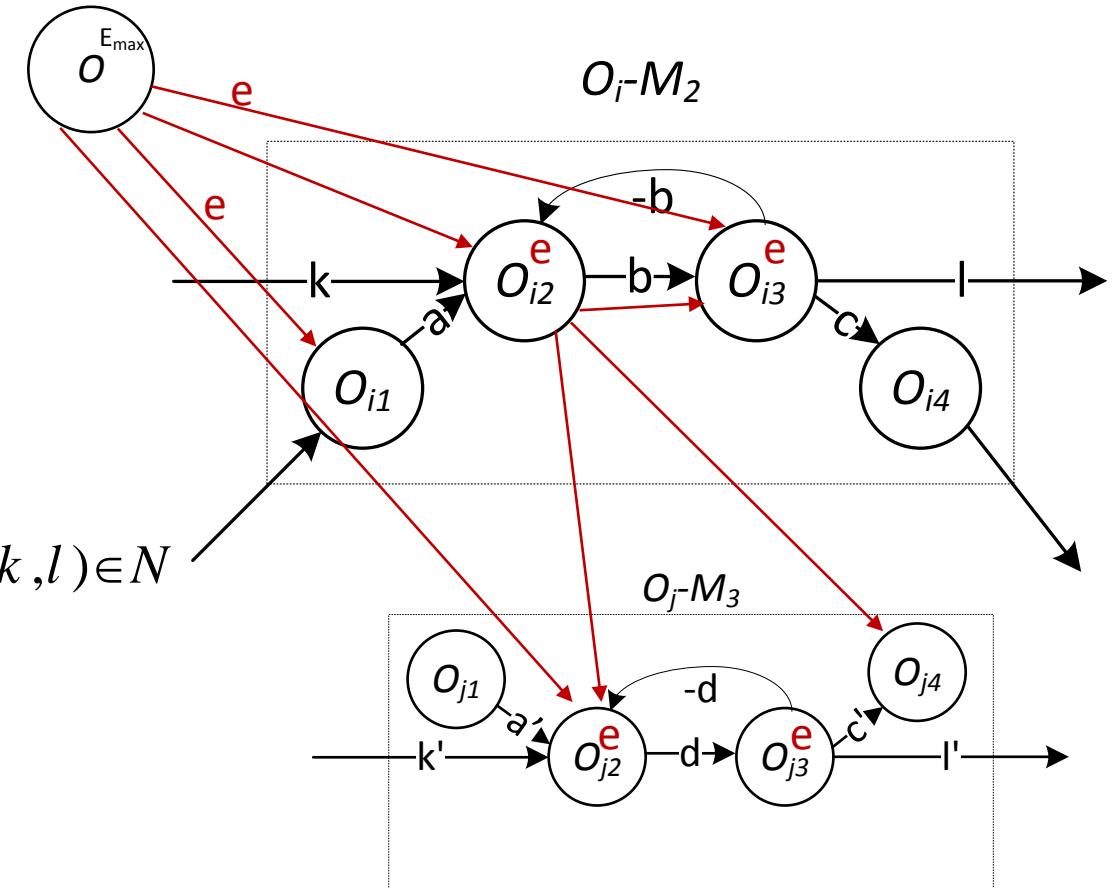
$$\varphi_{i,k,j,l} \leq H \cdot z_{i,k,j,l}, \forall i, j \in V, \forall k, l \in N$$

$$z_{i,k,j,l} \leq \varphi_{i,k,j,l}, \forall i, j \in V, \forall k, l \in N$$

$$s_{j,l} - s_{i,k} - Hz_{i,k,j,l} \geq p_{i,k} - H, \forall (i, j) \in V, \forall (k, l) \in N$$

$$z_{i,k,j,l} = 0, \forall (i, j) \in V, \forall k \in N_i, \forall l \in N_j,$$

$$J_i = J_j, (j < i) \vee (j = i \wedge l < k)$$



Job-shop Flexible sous contrainte énergétique: Modélisation

■ S.t.

■ Contraintes d'allumage/extinction

$$x_{0,j,m} \leq l_{0,j,m}, \forall j \in V, \forall m \in M_j$$

$$l_{i,j,m} \leq x_{i,j,m}, \forall (i,j) \in V, \forall m \in M_i \cap M_j, J_i \neq J_j \cup i < j$$

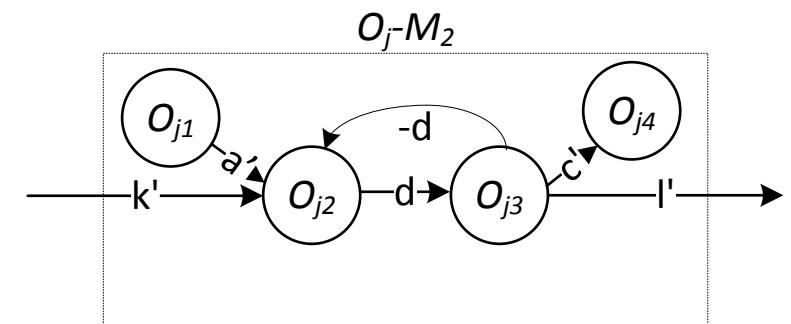
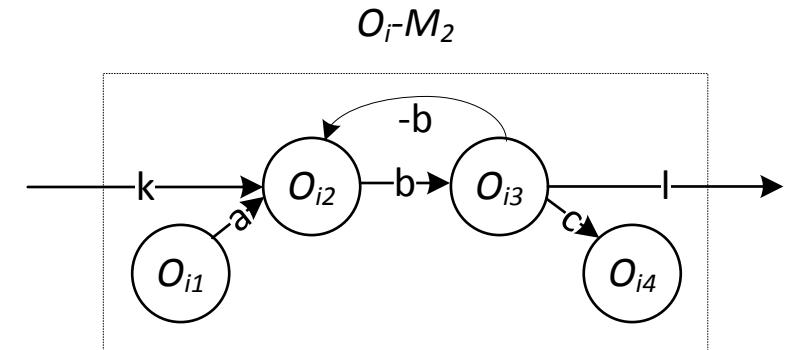
$$p_{j,1} = \sum_{i \in V^0 \setminus j} \sum_{m \in M_i \cap M_j} l_{i,j,m} P_{j,1,m}, \forall j \in V$$

$$p_{i,|N_i|} = \sum_{j \in V^* \setminus i} \sum_{m \in M_i \cap M_j} l_{i,j,m} P_{i,|N_i|,m}, \forall j \in V$$

$$e_{j,1} = \sum_{i \in V^0 - j} \sum_{m \in M_i \cap M_j} l_{i,j,m} E_{j,1,m}, \forall j \in V$$

$$e_{i,|N_i|} = \sum_{j \in V^* - i} \sum_{m \in M_i \cap M_j} l_{i,j,m} E_{i,|N_i|,m}, \forall i \in V$$

$$e_{i,|N_i|}^{base} = \sum_{j \in V} \sum_{m \in M_i \cap M_j} l_{i,j,m} E^{base}_{i,m}, \forall i \in V$$



$$e_{i,1}^{base} = \sum_{j \in V} \sum_{m \in M_i \cap M_j} l_{j,i,m} E^{base}_{j,m}, \forall i \in V$$

Job-shop Flexible sous contrainte énergétique: Modélisation

■ S.t.

■ Contraintes d'allumage/extinction

$$x_{0,j,m} \leq l_{0,j,m}, \forall j \in V, \forall m \in M_j$$

$$l_{i,j,m} \leq x_{i,j,m}, \forall (i,j) \in V, \forall m \in M_i \cap M_j, J_i \neq J_j \cup i < j$$

$$p_{j,1} = \sum_{i \in V^0 \setminus j} \sum_{m \in M_i \cap M_j} l_{i,j,m} P_{j,1,m}, \forall j \in V$$

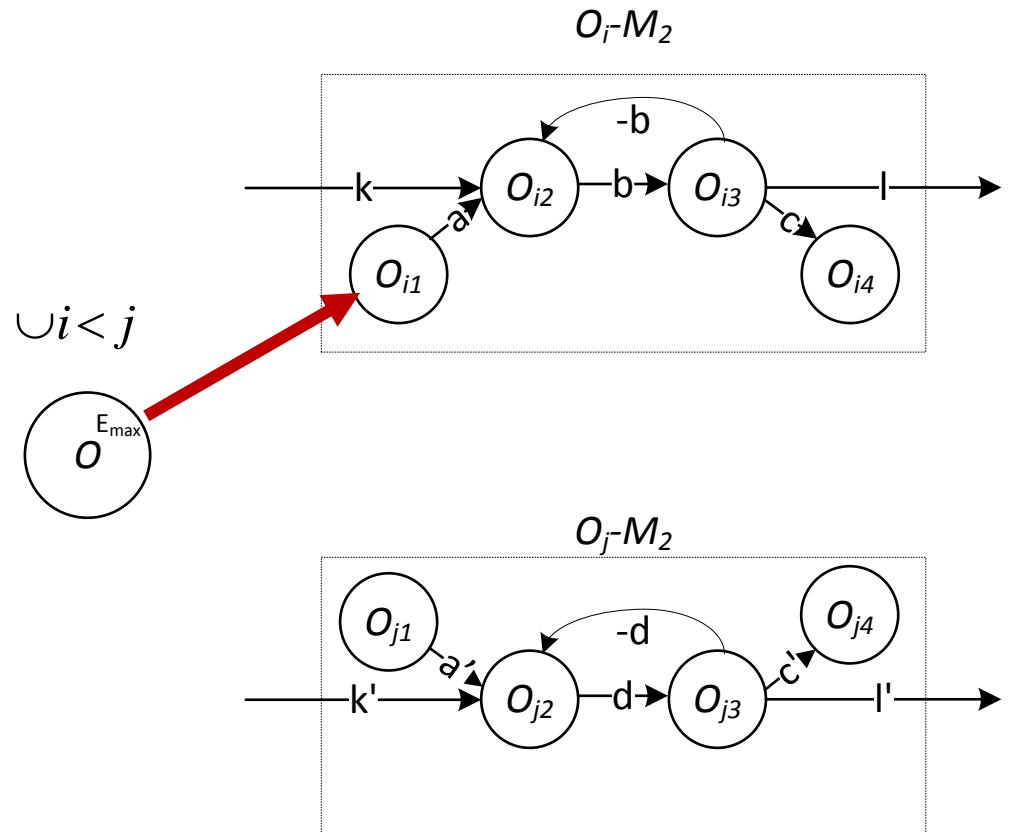
$$p_{i,|N_i|} = \sum_{j \in V^* \setminus i} \sum_{m \in M_i \cap M_j} l_{i,j,m} P_{i,|N_i|,m}, \forall j \in V$$

$$e_{j,1} = \sum_{i \in V^0 - j} \sum_{m \in M_i \cap M_j} l_{i,j,m} E_{j,1,m}, \forall j \in V$$

$$e_{i,|N_i|} = \sum_{j \in V^* - i} \sum_{m \in M_i \cap M_j} l_{i,j,m} E_{i,|N_i|,m}, \forall i \in V$$

$$e_{i,|N_i|}^{base} = \sum_{j \in V} \sum_{m \in M_i \cap M_j} l_{i,j,m} E^{base}_{i,m}, \forall i \in V$$

$$e_{i,1}^{base} = \sum_{j \in V} \sum_{m \in M_i \cap M_j} l_{j,i,m} E^{base}_{j,m}, \forall i \in V$$



Job-shop Flexible sous contrainte énergétique: Modélisation

■ S.t.

■ Contraintes d'allumage/extinction

$$x_{0,j,m} \leq l_{0,j,m}, \forall j \in V, \forall m \in M_j$$

$$l_{i,j,m} \leq x_{i,j,m}, \forall (i,j) \in V, \forall m \in M_i \cap M_j, J_i \neq J_j \cup i < j$$

$$p_{j,1} = \sum_{i \in V^0 \setminus j} \sum_{m \in M_i \cap M_j} l_{i,j,m} P_{j,1,m}, \forall j \in V$$

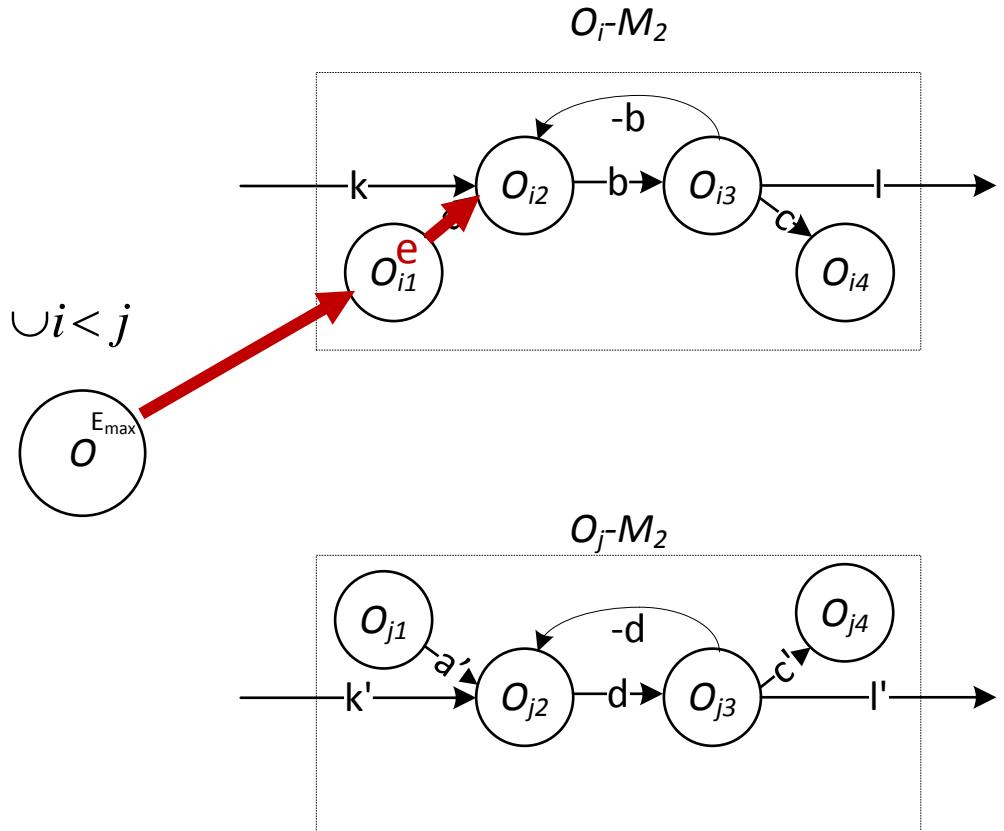
$$p_{i,|N_i|} = \sum_{j \in V^* \setminus i} \sum_{m \in M_i \cap M_j} l_{i,j,m} P_{i,|N_i|,m}, \forall j \in V$$

$$e_{j,1} = \sum_{i \in V^0 - j} \sum_{m \in M_i \cap M_j} l_{i,j,m} E_{j,1,m}, \forall j \in V$$

$$e_{i,|N_i|} = \sum_{j \in V^* - i} \sum_{m \in M_i \cap M_j} l_{i,j,m} E_{i,|N_i|,m}, \forall i \in V$$

$$e_{i,|N_i|}^{base} = \sum_{j \in V} \sum_{m \in M_i \cap M_j} l_{i,j,m} E^{base}_{i,m}, \forall i \in V$$

$$e_{i,1}^{base} = \sum_{j \in V} \sum_{m \in M_i \cap M_j} l_{j,i,m} E^{base}_{j,m}, \forall i \in V$$



Job-shop Flexible sous contrainte énergétique: Modélisation

■ S.t.

■ Contraintes d'allumage/extinction

$$x_{0,j,m} \leq l_{0,j,m}, \forall j \in V, \forall m \in M_j$$

$$l_{i,j,m} \leq x_{i,j,m}, \forall (i,j) \in V, \forall m \in M_i \cap M_j, J_i \neq J_j \cup i < j$$

$$p_{j,1} = \sum_{i \in V^0 \setminus j} \sum_{m \in M_i \cap M_j} l_{i,j,m} P_{j,1,m}, \forall j \in V$$

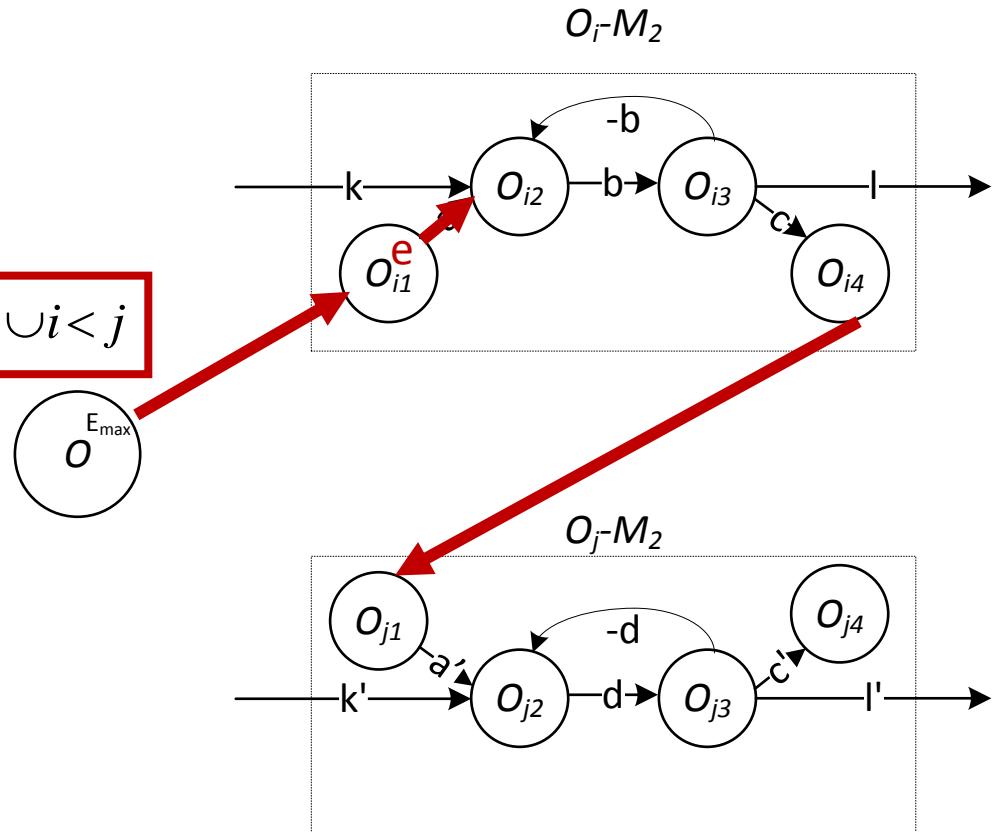
$$p_{i,|N_i|} = \sum_{j \in V^* \setminus i} \sum_{m \in M_i \cap M_j} l_{i,j,m} P_{i,|N_i|,m}, \forall j \in V$$

$$e_{j,1} = \sum_{i \in V^0 - j} \sum_{m \in M_i \cap M_j} l_{i,j,m} E_{j,1,m}, \forall j \in V$$

$$e_{i,|N_i|} = \sum_{j \in V^* - i} \sum_{m \in M_i \cap M_j} l_{i,j,m} E_{i,|N_i|,m}, \forall i \in V$$

$$e_{i,|N_i|}^{base} = \sum_{j \in V} \sum_{m \in M_i \cap M_j} l_{i,j,m} E^{base}_{i,m}, \forall i \in V$$

$$e_{i,1}^{base} = \sum_{j \in V} \sum_{m \in M_i \cap M_j} l_{j,i,m} E^{base}_{j,m}, \forall i \in V$$



Job-shop Flexible sous contrainte énergétique: Modélisation

■ S.t.

■ Contraintes d'allumage/extinction

$$x_{0,j,m} \leq l_{0,j,m}, \forall j \in V, \forall m \in M_j$$

$$l_{i,j,m} \leq x_{i,j,m}, \forall (i,j) \in V, \forall m \in M_i \cap M_j, J_i \neq J_j \cup i < j$$

$$p_{j,1} = \sum_{i \in V^0 \setminus j} \sum_{m \in M_i \cap M_j} l_{i,j,m} P_{j,1,m}, \forall j \in V$$

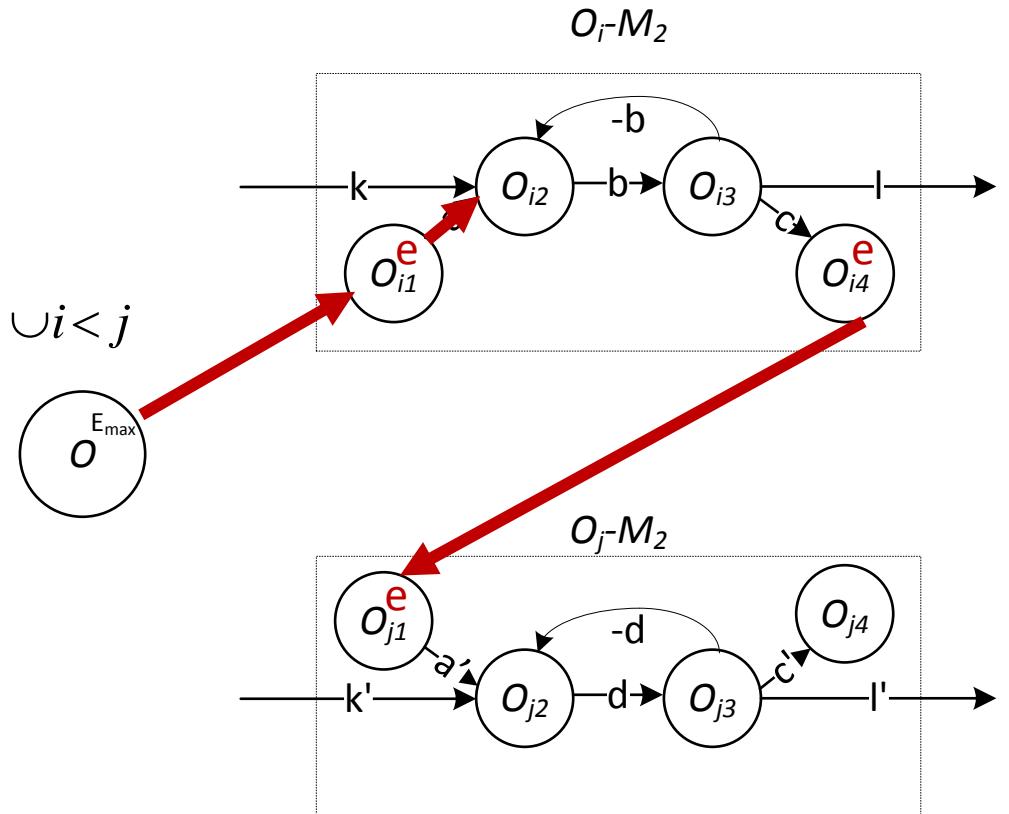
$$p_{i,|N_i|} = \sum_{j \in V^* \setminus i} \sum_{m \in M_i \cap M_j} l_{i,j,m} P_{i,|N_i|,m}, \forall j \in V$$

$$e_{j,1} = \sum_{i \in V^0 - j} \sum_{m \in M_i \cap M_j} l_{i,j,m} E_{j,1,m}, \forall j \in V$$

$$e_{i,|N_i|} = \sum_{j \in V^* - i} \sum_{m \in M_i \cap M_j} l_{i,j,m} E_{i,|N_i|,m}, \forall i \in V$$

$$e_{i,|N_i|}^{base} = \sum_{j \in V} \sum_{m \in M_i \cap M_j} l_{i,j,m} E_{i,|N_i|,m}^{base}, \forall i \in V$$

$$e_{i,1}^{base} = \sum_{j \in V} \sum_{m \in M_i \cap M_j} l_{j,i,m} E_{j,1,m}^{base}, \forall i \in V$$



Job-shop Flexible sous contrainte énergétique: Modélisation

■ S.t.

■ Contraintes d'allumage/extinction

$$x_{0,j,m} \leq l_{0,j,m}, \forall j \in V, \forall m \in M_j$$

$$l_{i,j,m} \leq x_{i,j,m}, \forall (i,j) \in V, \forall m \in M_i \cap M_j, J_i \neq J_j \cup i < j$$

$$p_{j,1} = \sum_{i \in V^0 \setminus j} \sum_{m \in M_i \cap M_j} l_{i,j,m} P_{j,1,m}, \forall j \in V$$

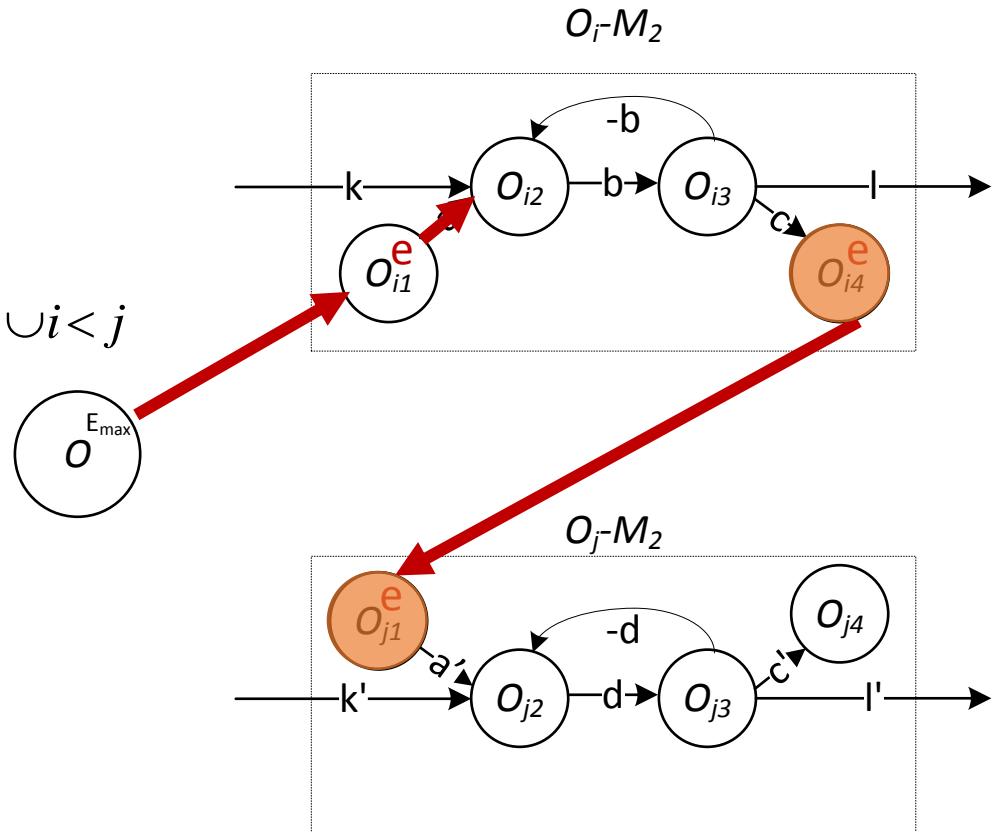
$$p_{i,|N_i|} = \sum_{j \in V^* \setminus i} \sum_{m \in M_i \cap M_j} l_{i,j,m} P_{i,|N_i|,m}, \forall j \in V$$

$$e_{j,1} = \sum_{i \in V^0 - j} \sum_{m \in M_i \cap M_j} l_{i,j,m} E_{j,1,m}, \forall j \in V$$

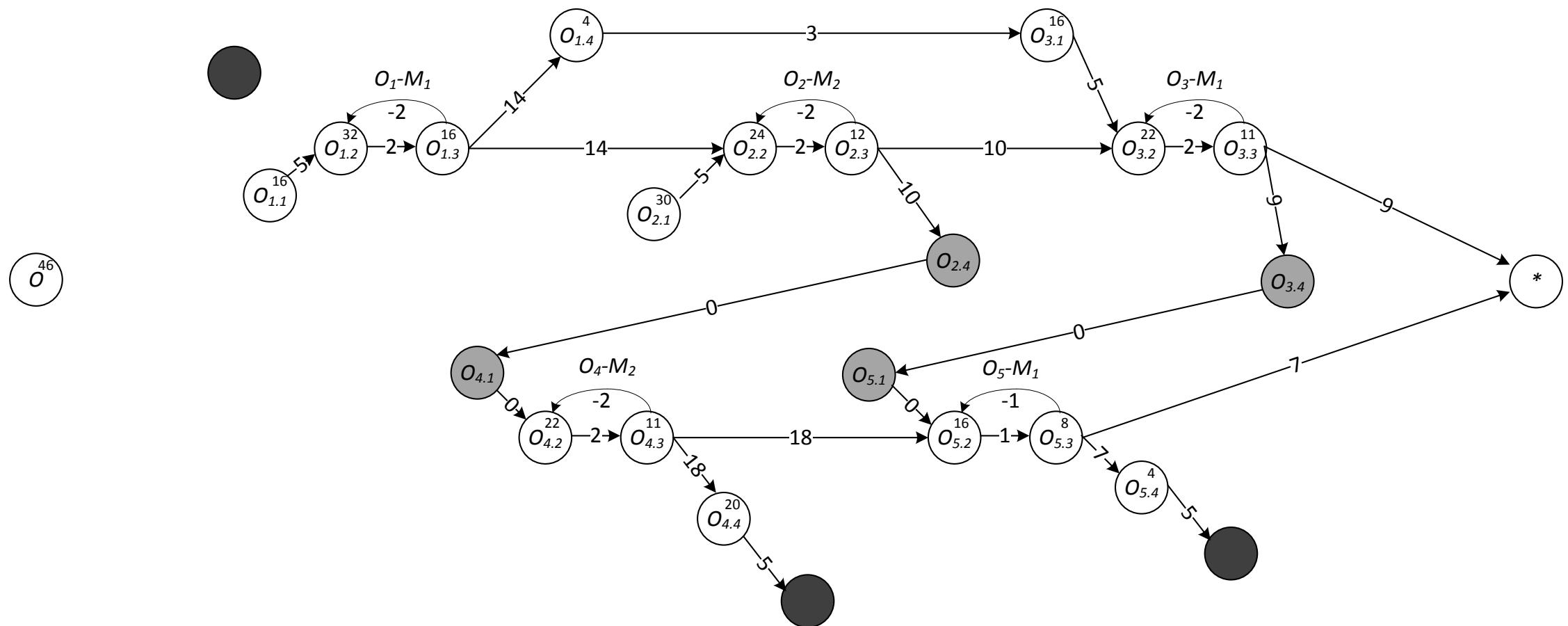
$$e_{i,|N_i|} = \sum_{j \in V^* - i} \sum_{m \in M_i \cap M_j} l_{i,j,m} E_{i,|N_i|,m}, \forall i \in V$$

$$e_{i,|N_i|}^{base} = \sum_{j \in V} \sum_{m \in M_i \cap M_j} l_{i,j,m} E_{i,|N_i|,m}^{base}, \forall i \in V$$

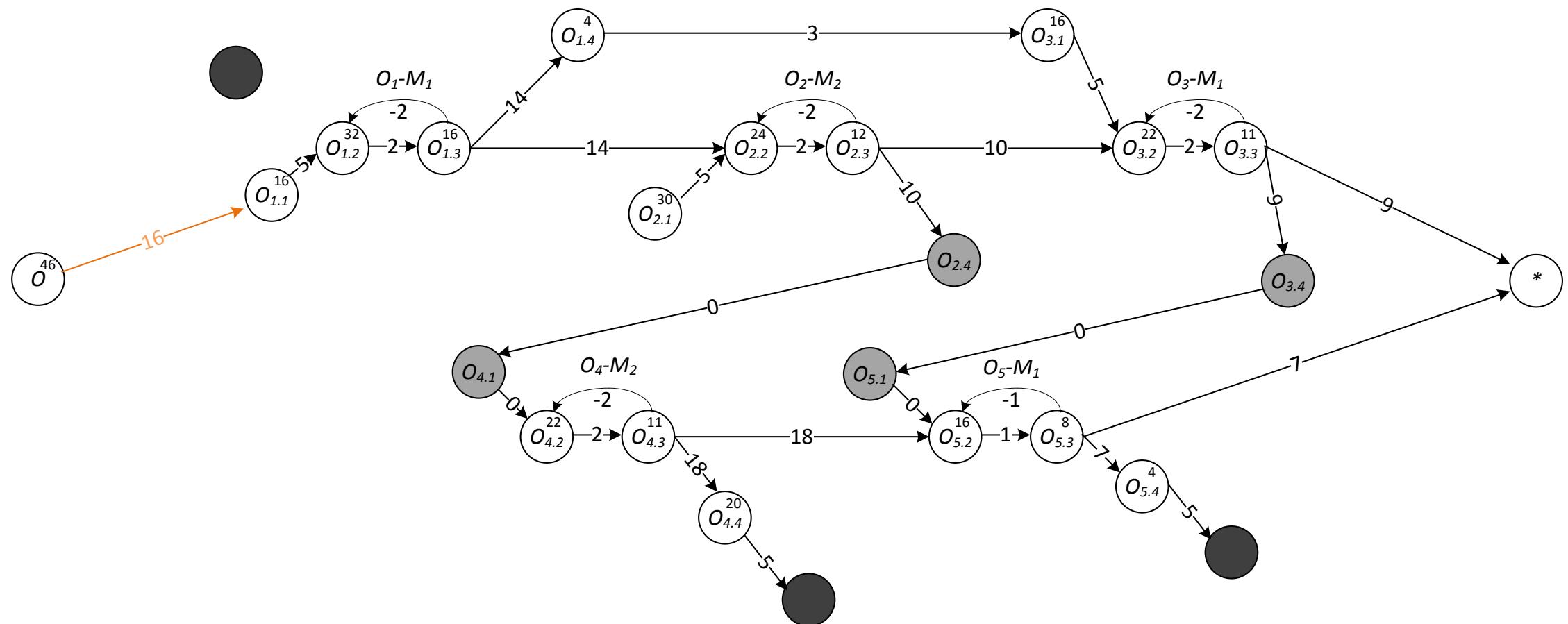
$$e_{i,1}^{base} = \sum_{j \in V} \sum_{m \in M_i \cap M_j} l_{j,i,m} E_{j,1,m}^{base}, \forall i \in V$$



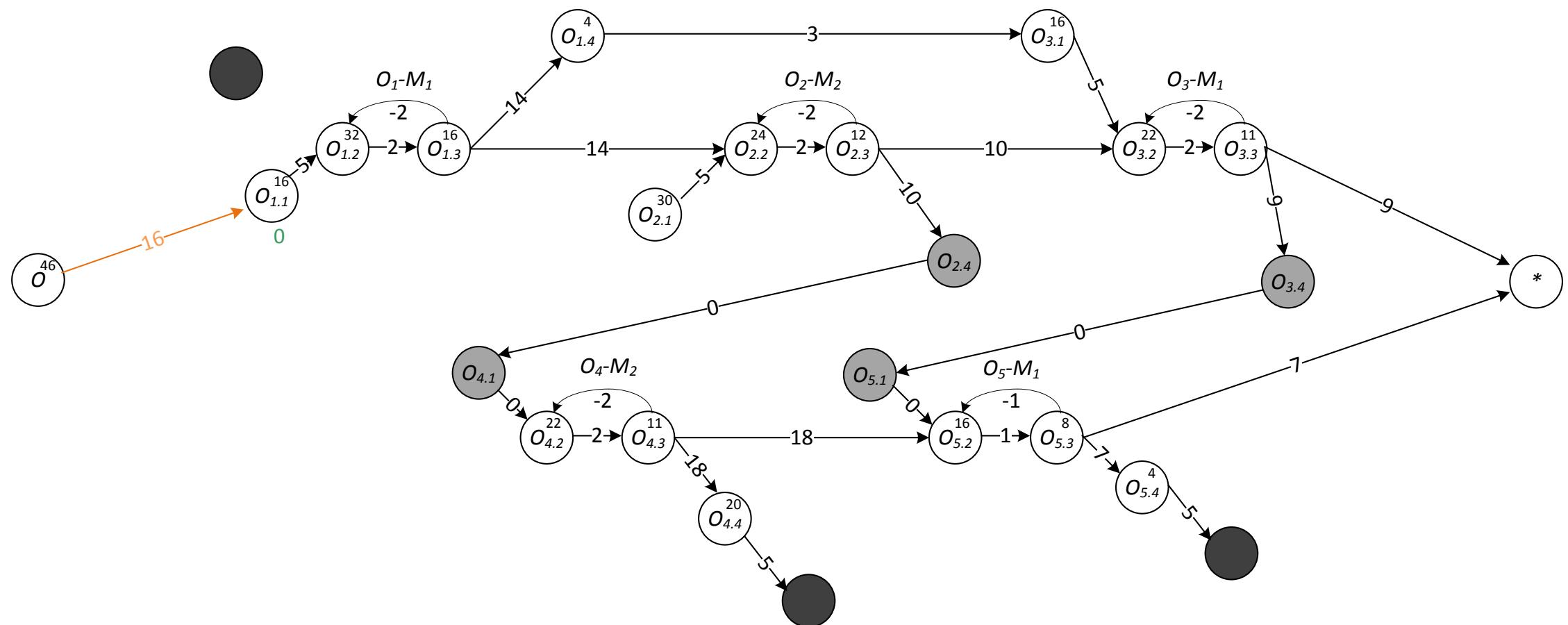
Job-shop Flexible sous contrainte énergétique: Exemple



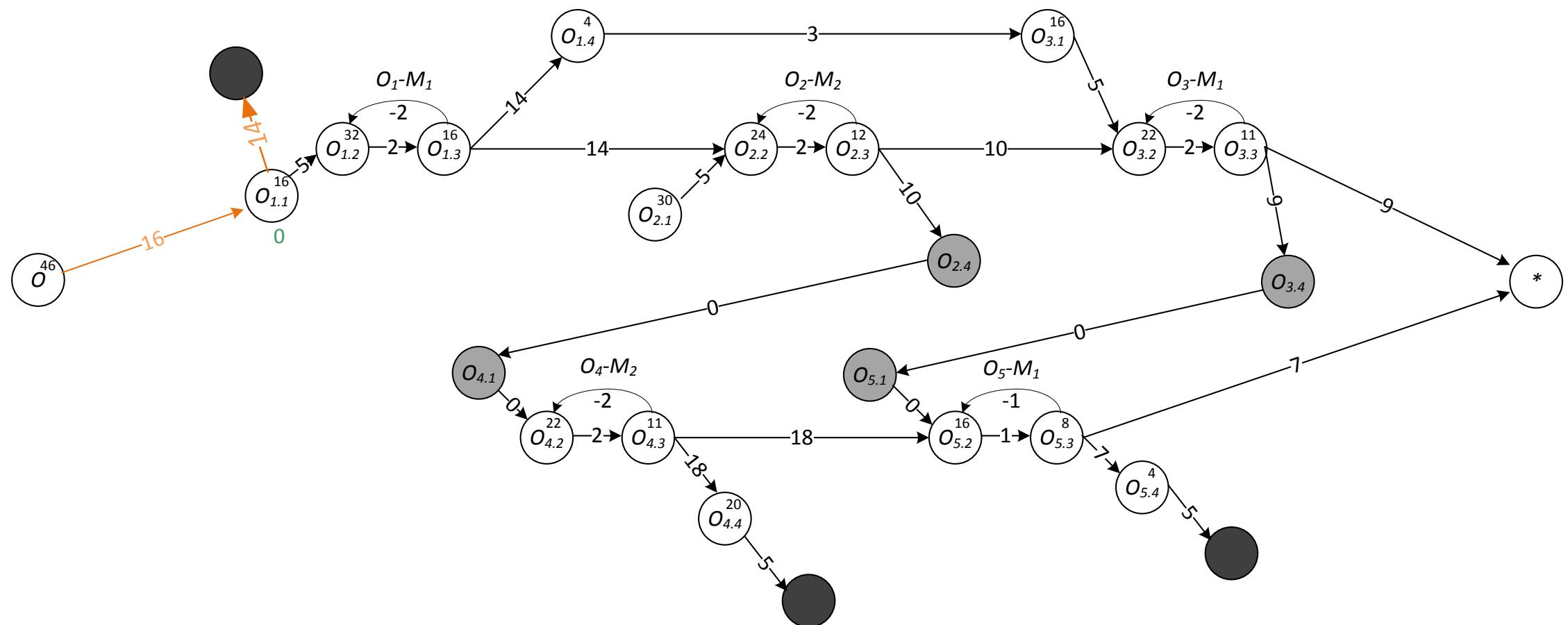
Job-shop Flexible sous contrainte énergétique: Exemple



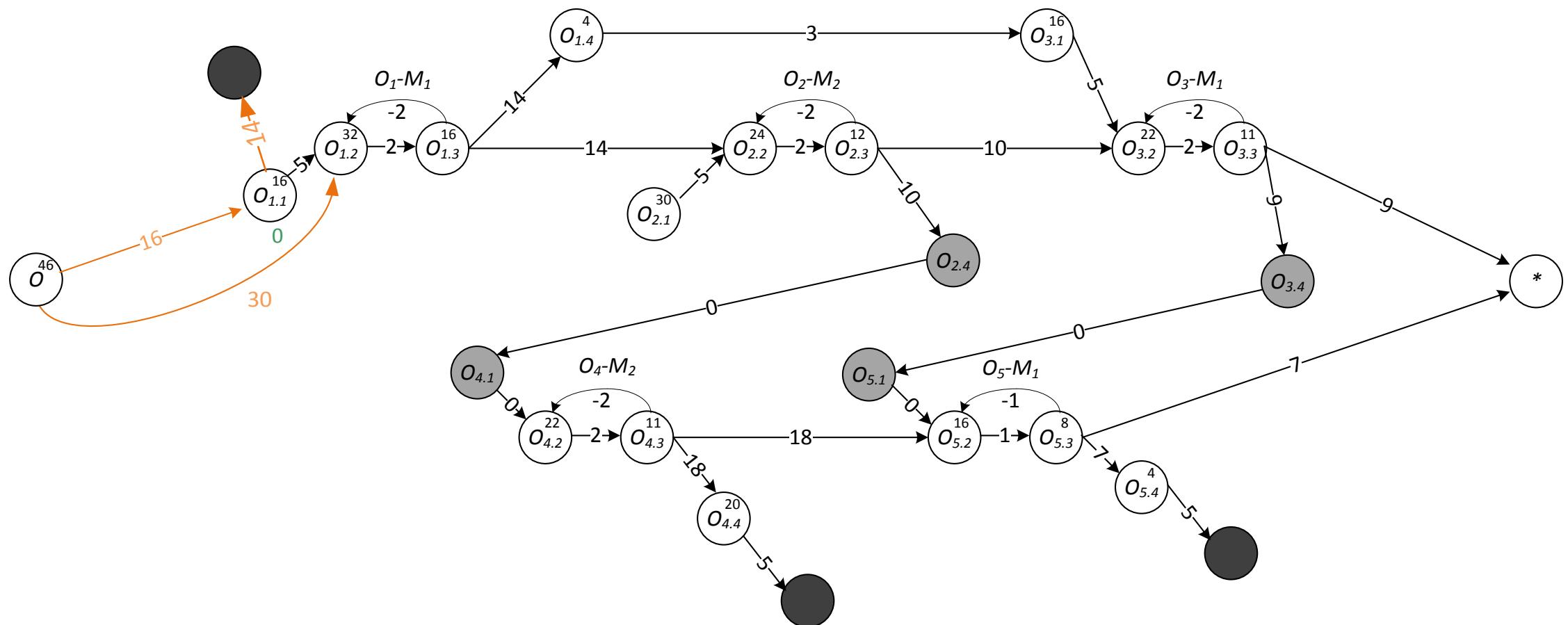
Job-shop Flexible sous contrainte énergétique: Exemple



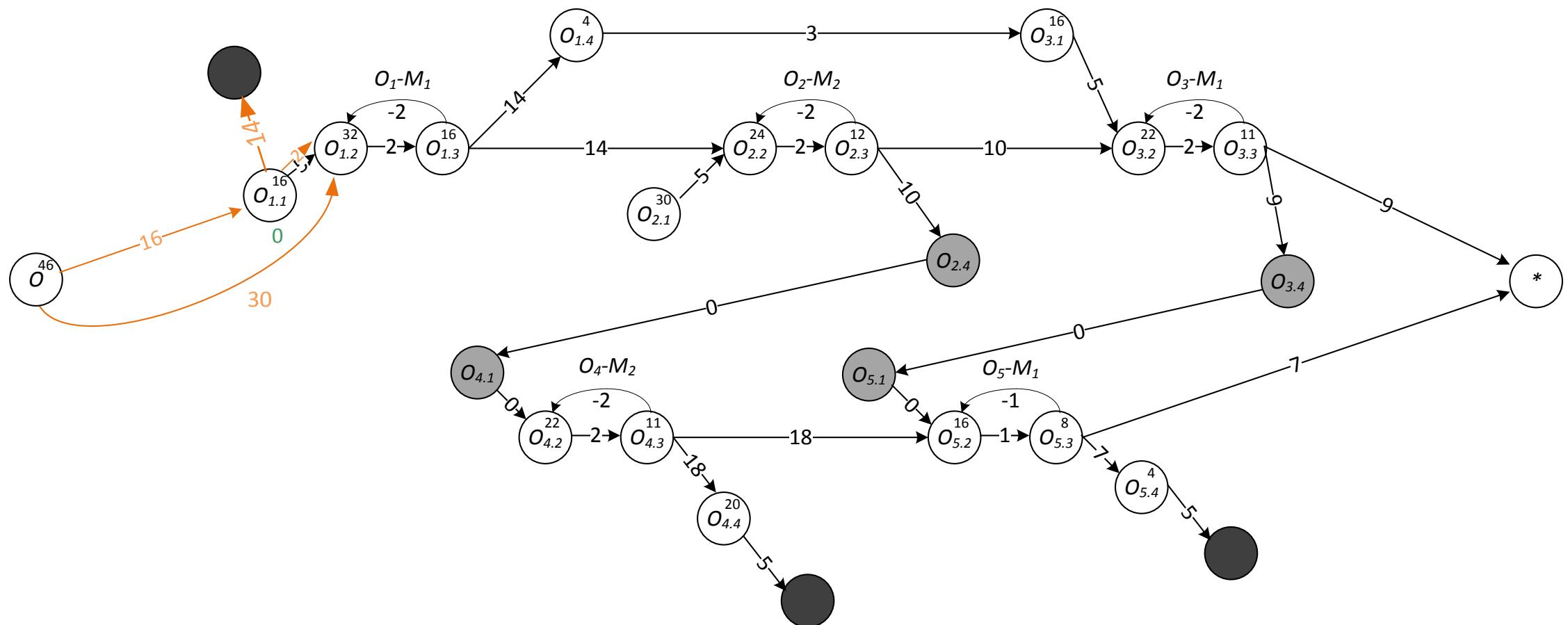
Job-shop Flexible sous contrainte énergétique: Exemple



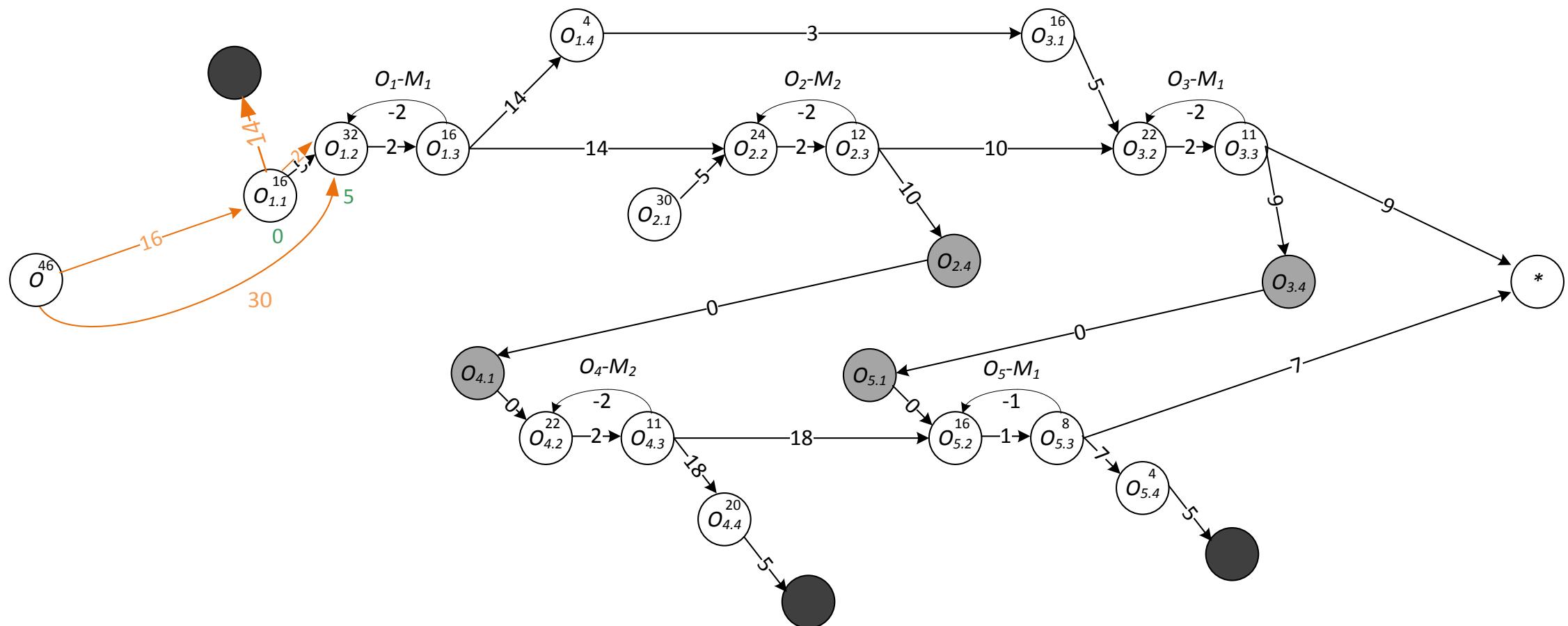
Job-shop Flexible sous contrainte énergétique: Exemple



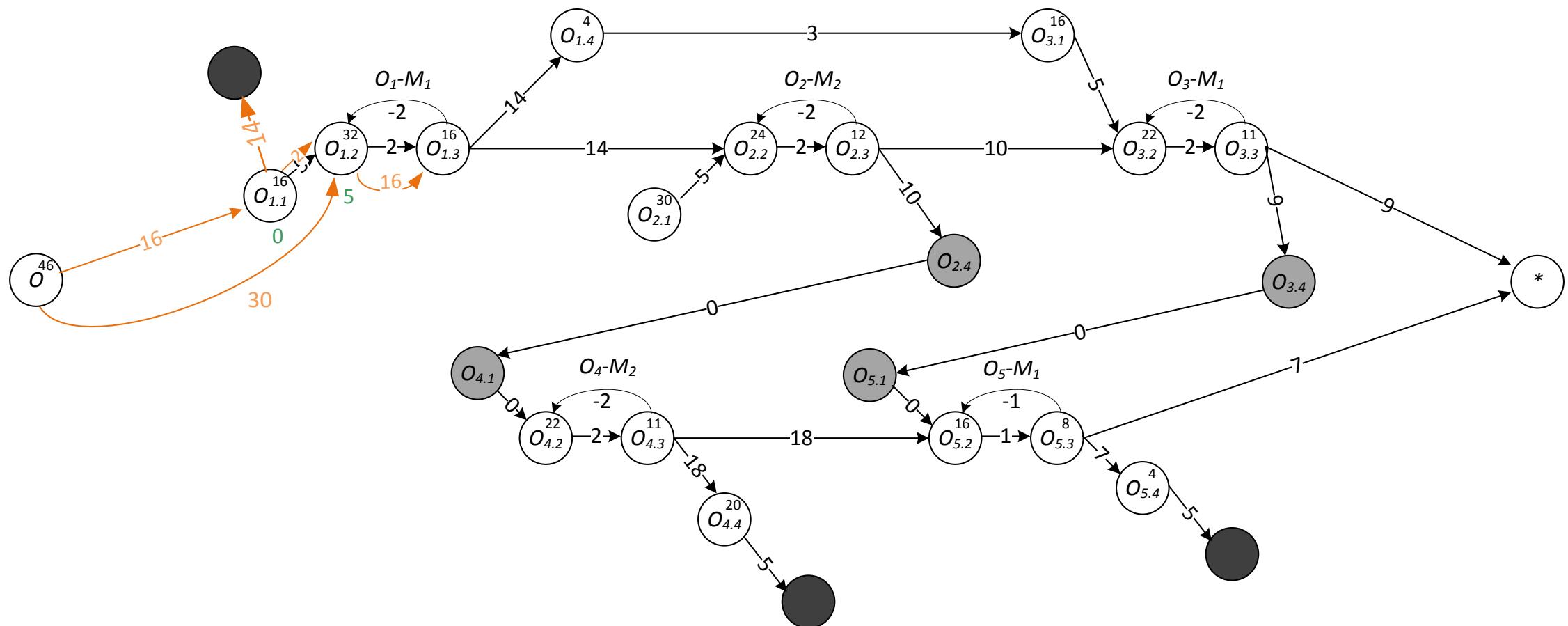
Job-shop Flexible sous contrainte énergétique: Exemple



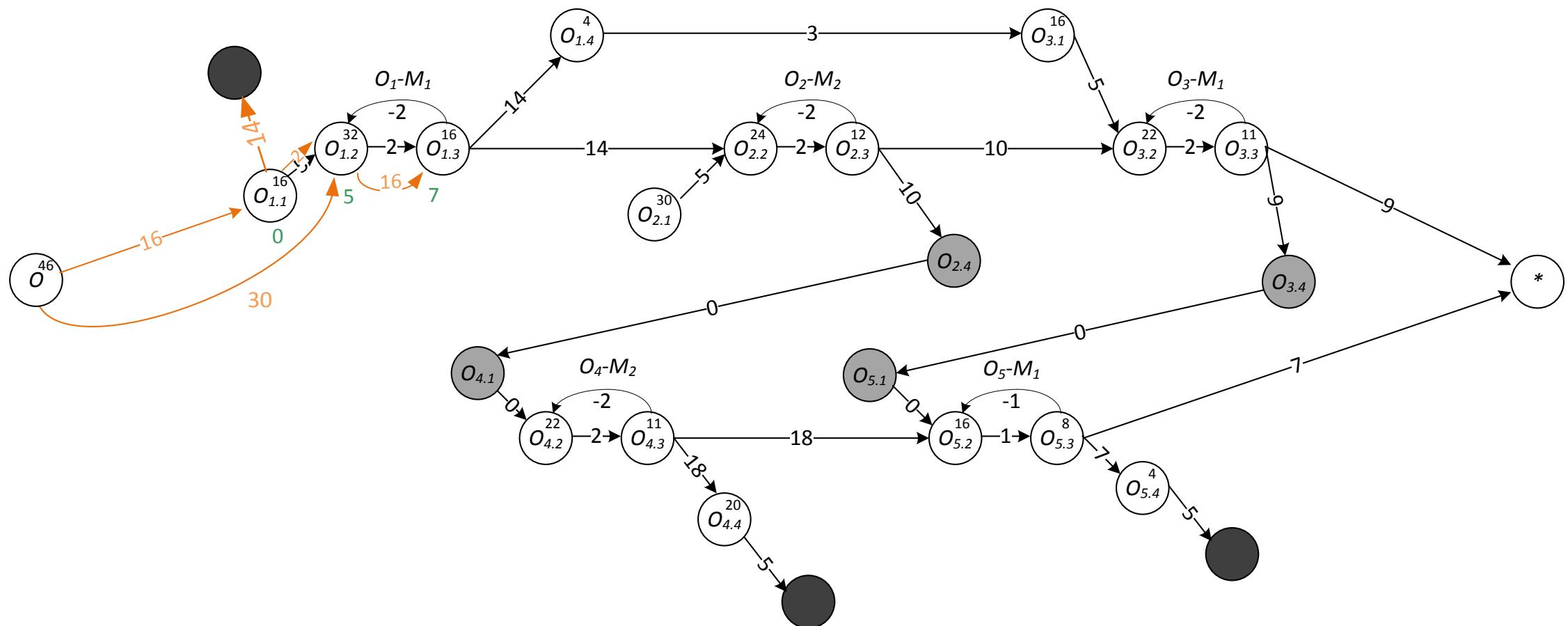
Job-shop Flexible sous contrainte énergétique: Exemple



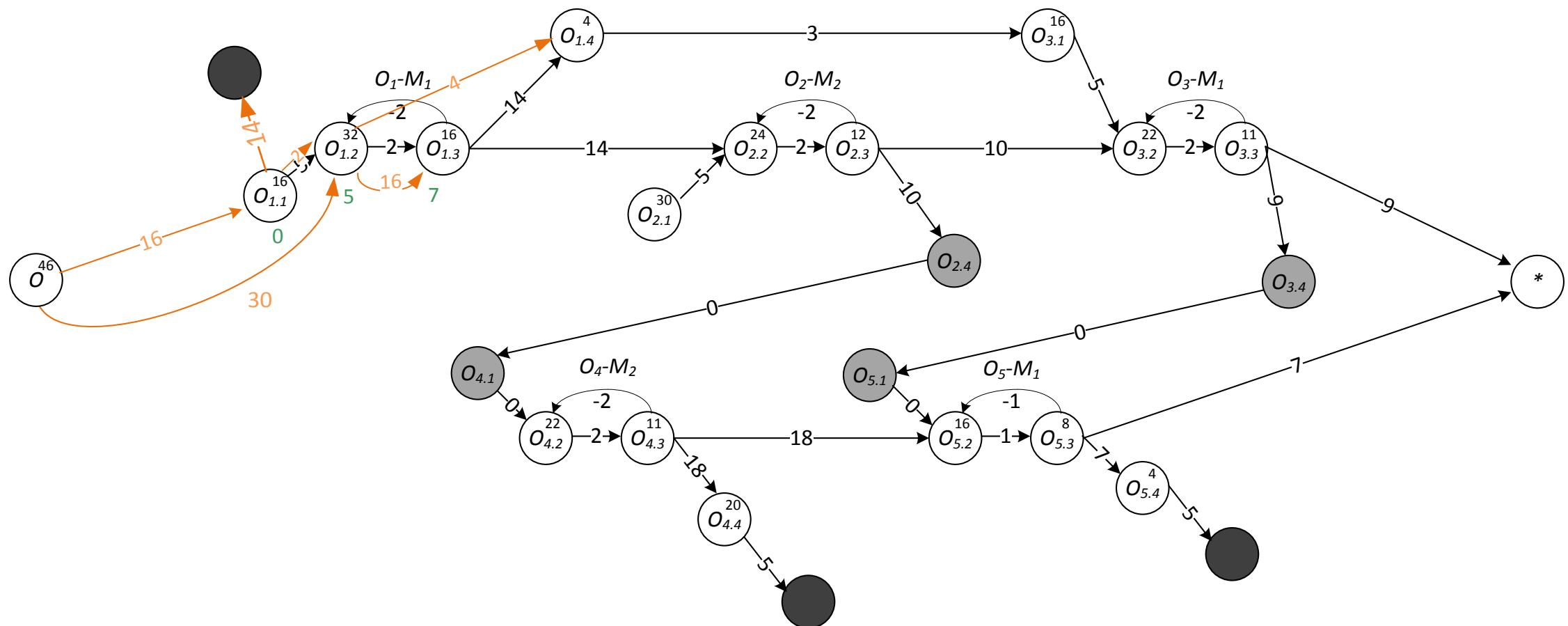
Job-shop Flexible sous contrainte énergétique: Exemple



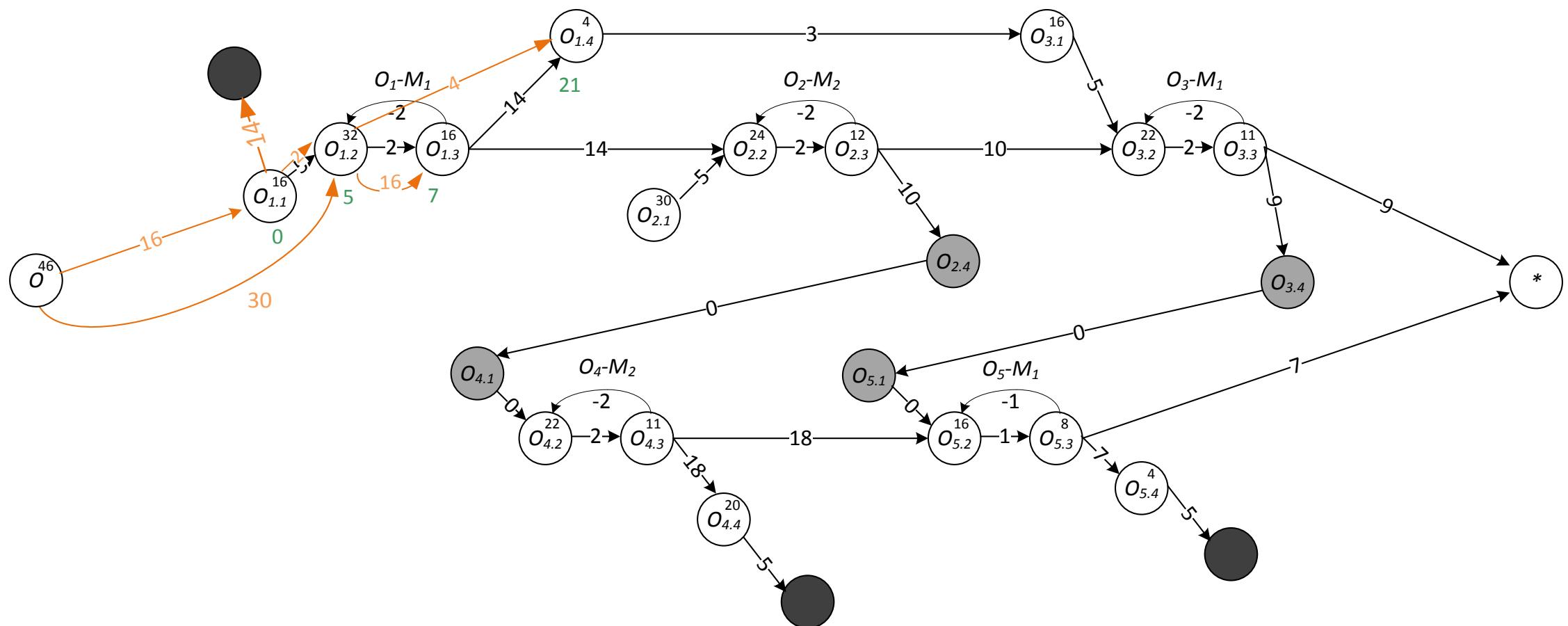
Job-shop Flexible sous contrainte énergétique: Exemple



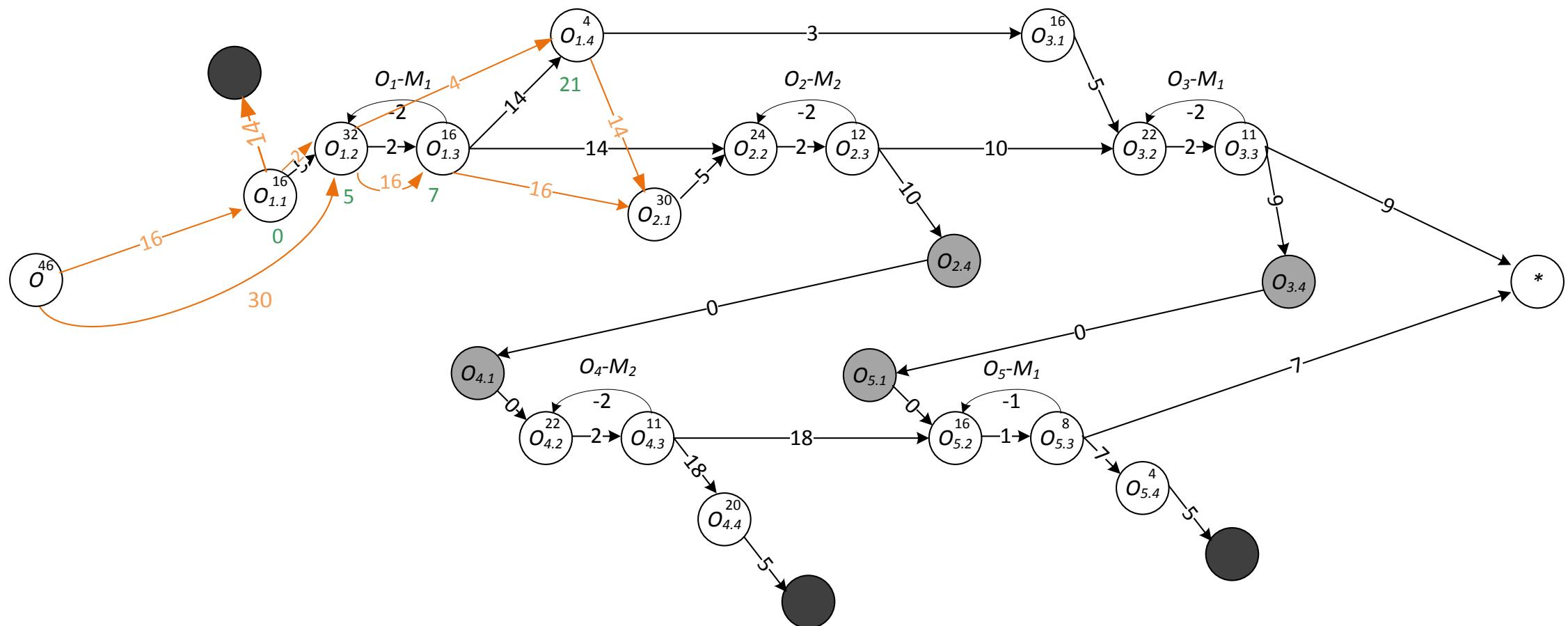
Job-shop Flexible sous contrainte énergétique: Exemple



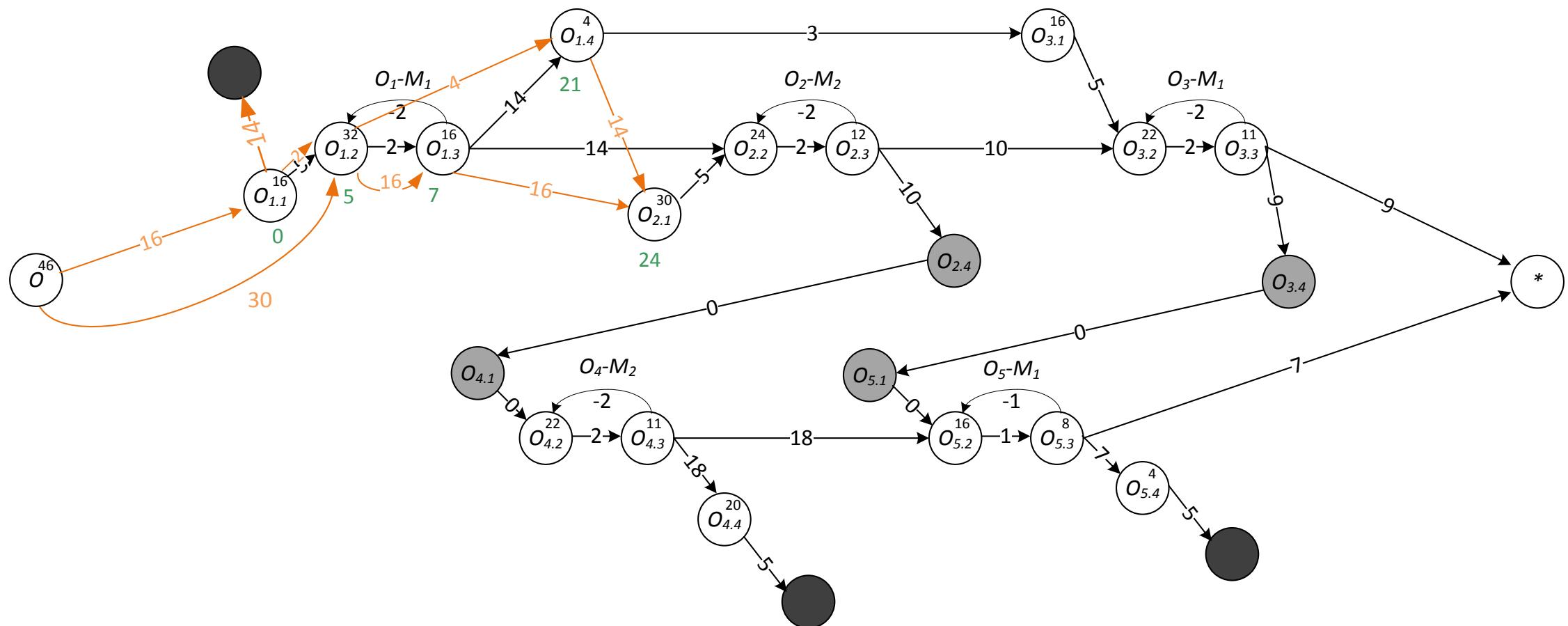
Job-shop Flexible sous contrainte énergétique: Exemple



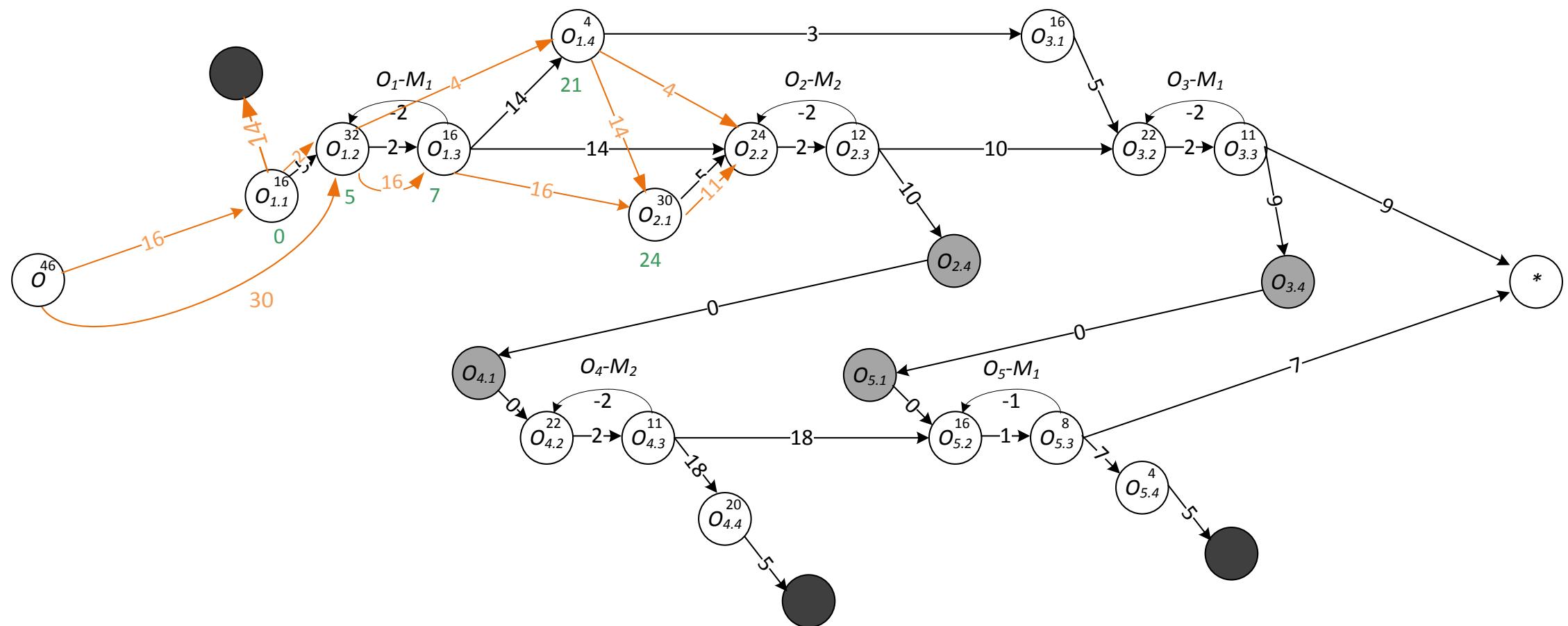
Job-shop Flexible sous contrainte énergétique: Exemple



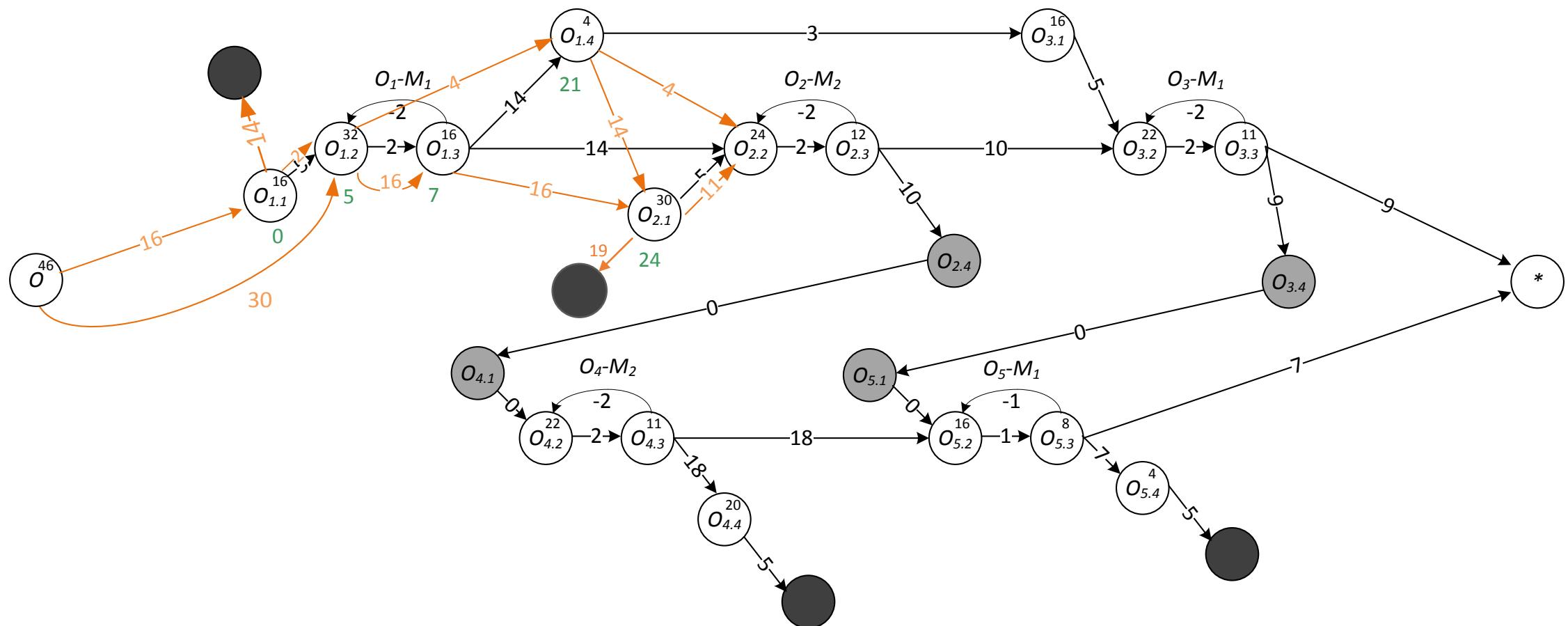
Job-shop Flexible sous contrainte énergétique: Exemple



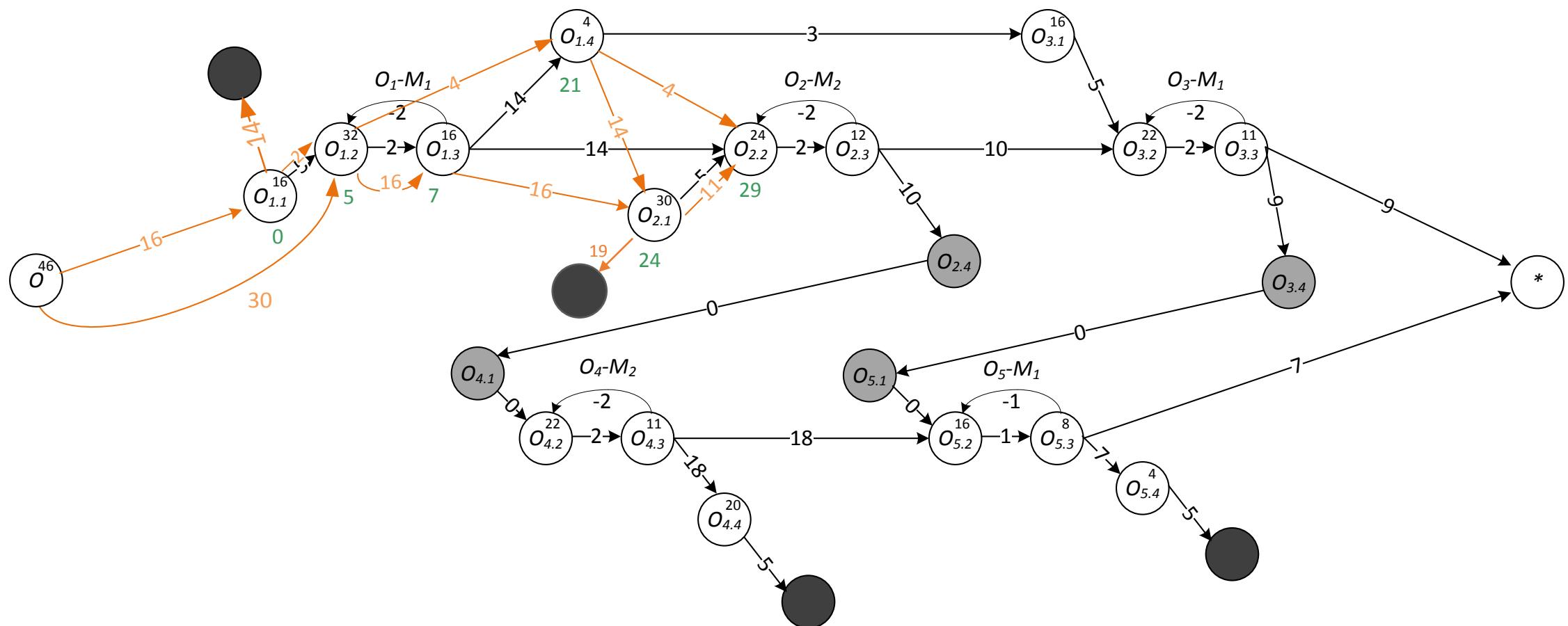
Job-shop Flexible sous contrainte énergétique: Exemple



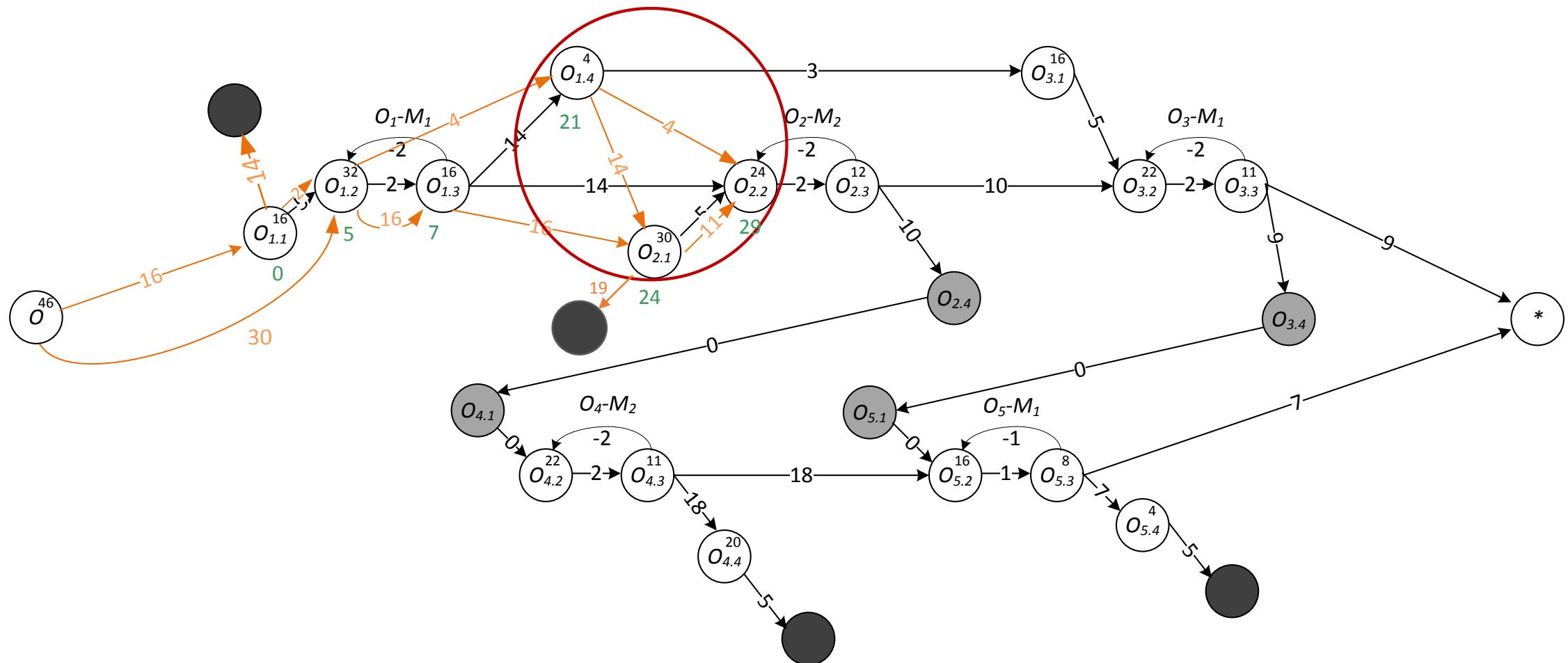
Job-shop Flexible sous contrainte énergétique: Exemple



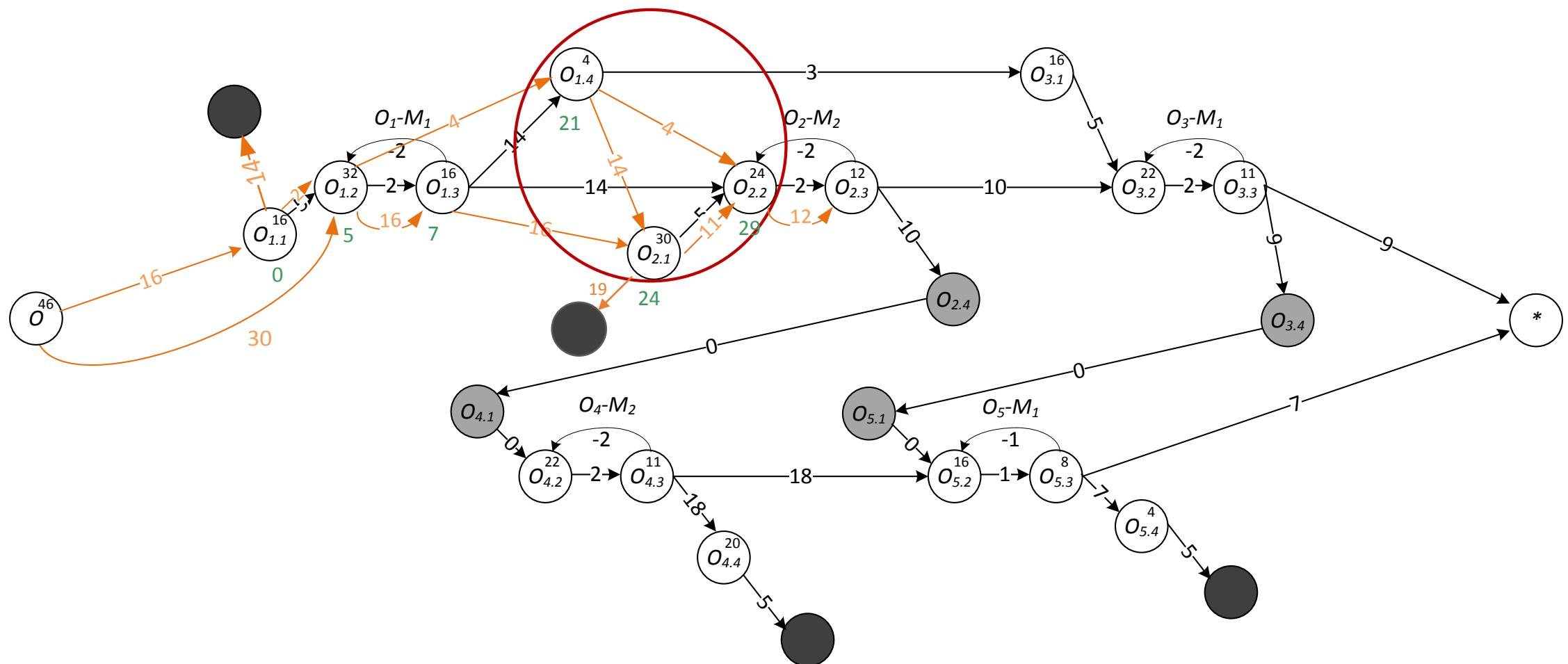
Job-shop Flexible sous contrainte énergétique: Exemple



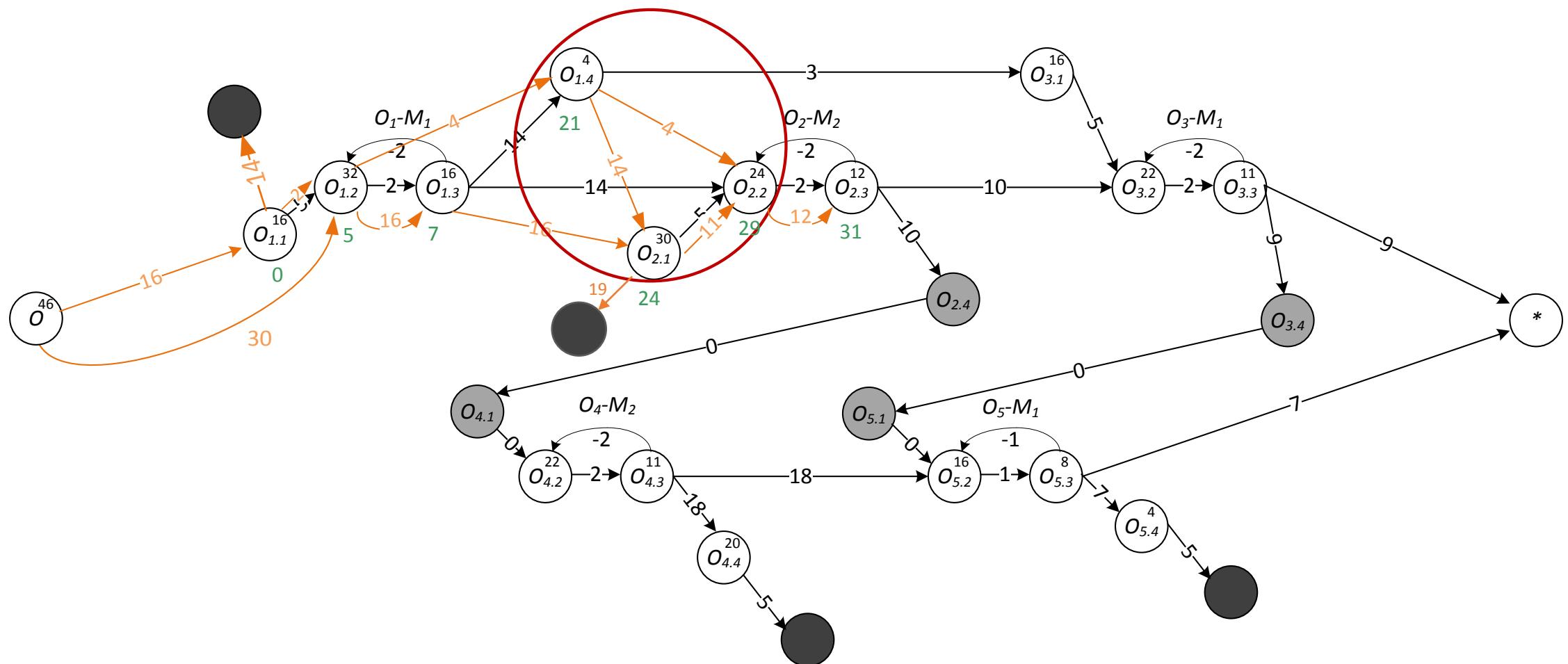
Job-shop Flexible sous contrainte énergétique: Exemple



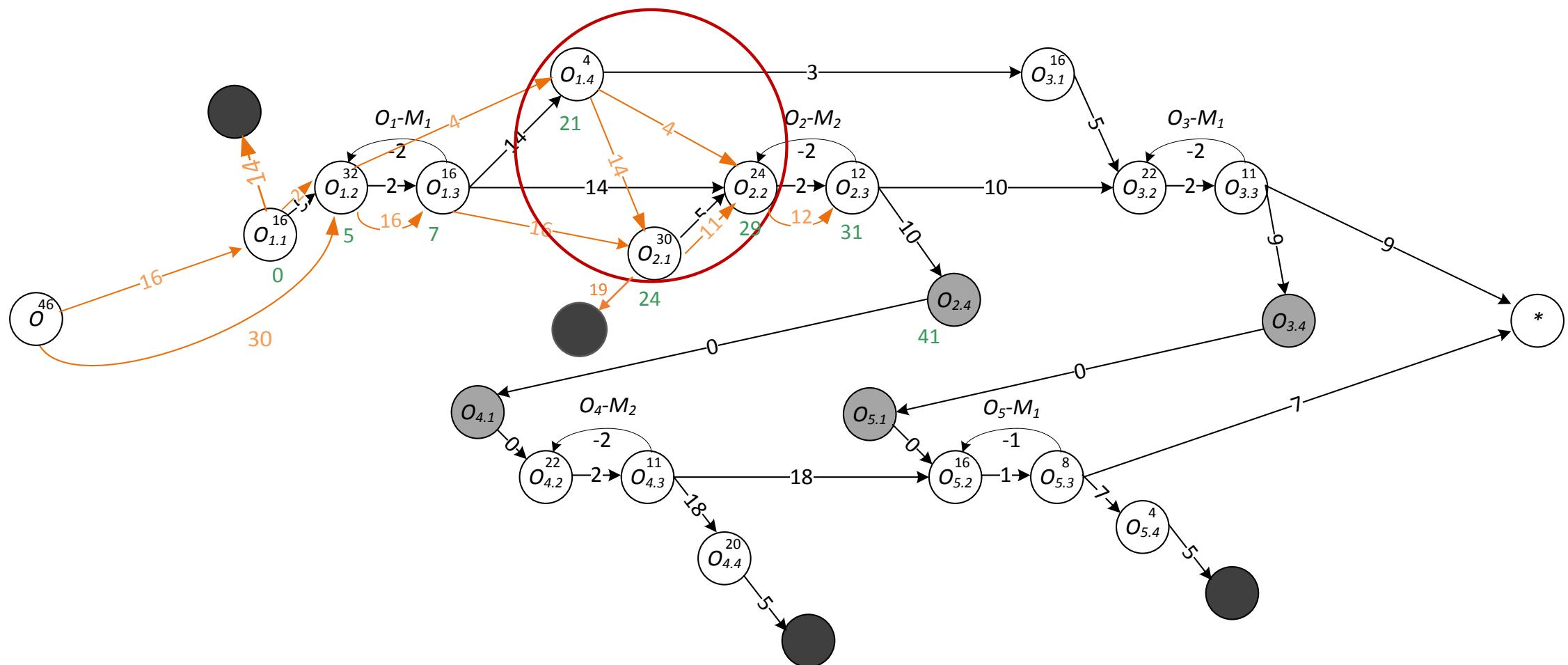
Job-shop Flexible sous contrainte énergétique: Exemple



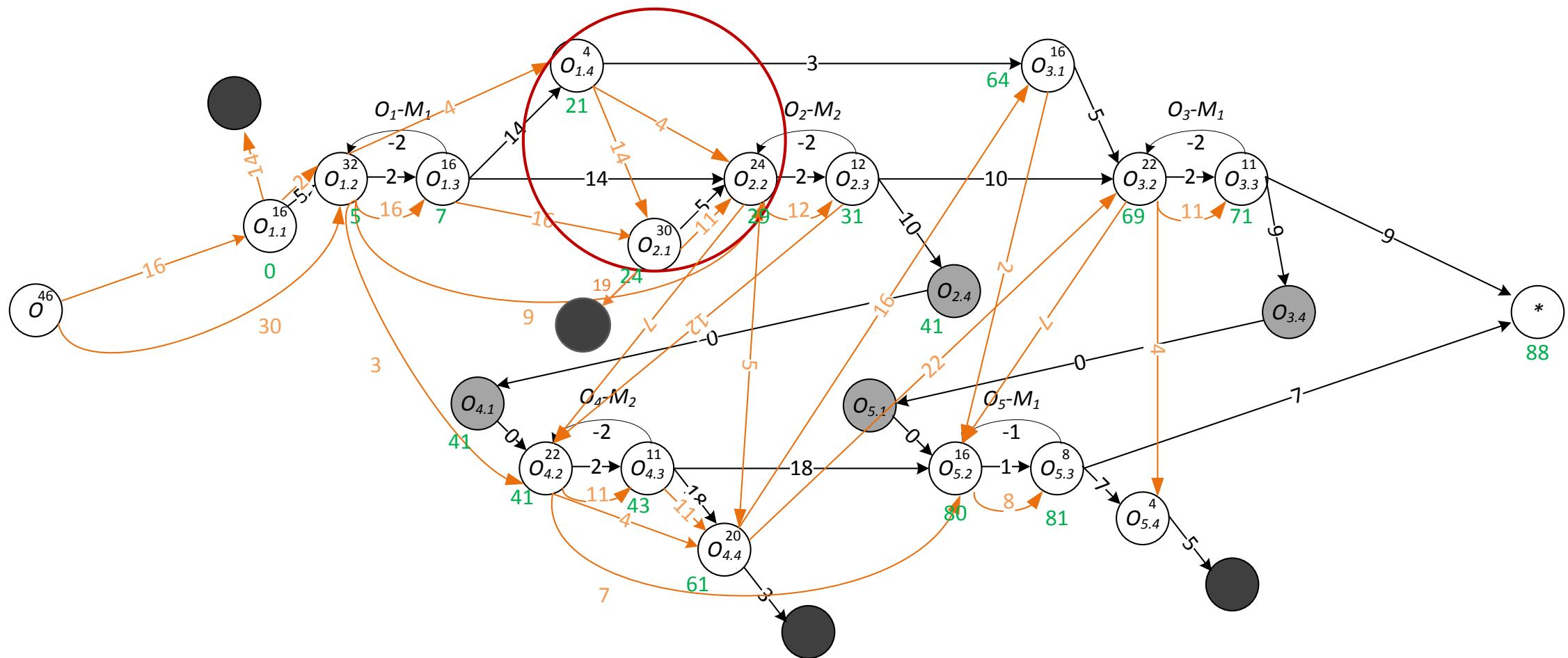
Job-shop Flexible sous contrainte énergétique: Exemple



Job-shop Flexible sous contrainte énergétique: Exemple



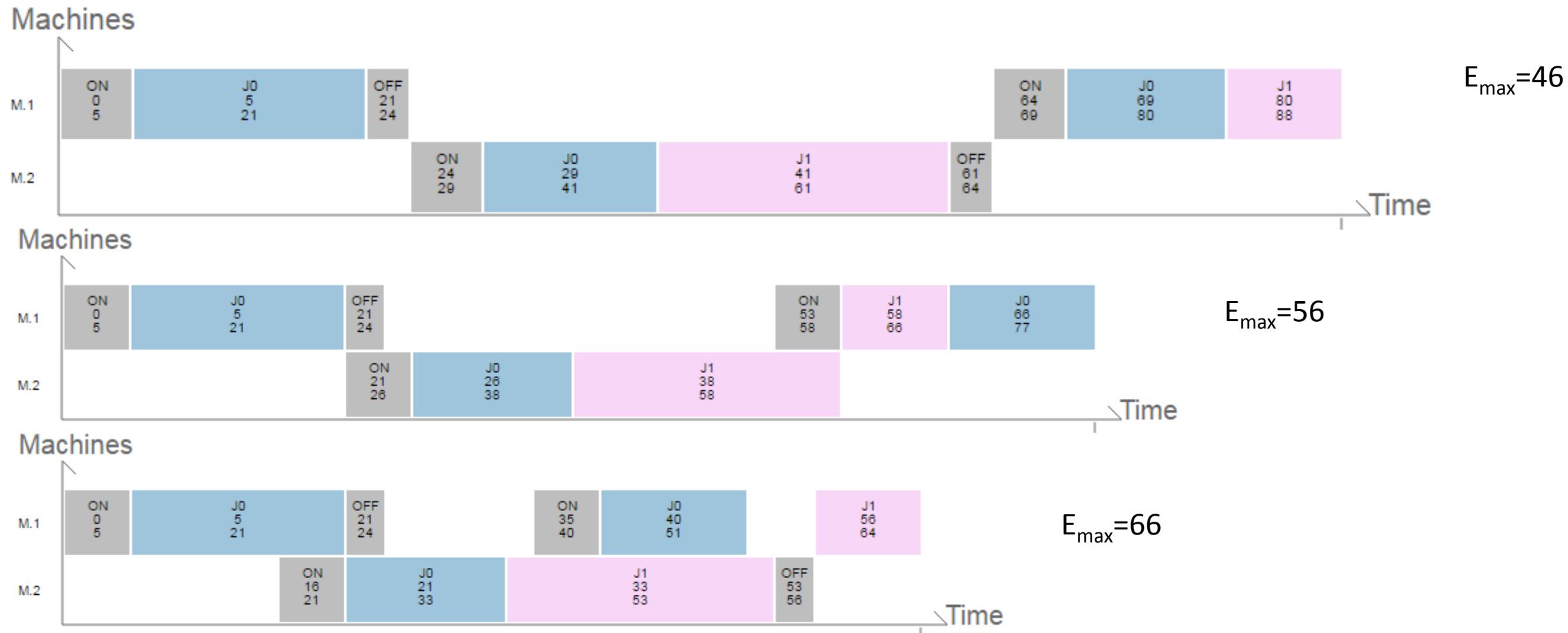
Job-shop Flexible sous contrainte énergétique: Exemple



JOB-SHOP FLEXIBLE SOUS CONTRAINTE ÉNERGÉTIQUE

Job-shop Flexible sous contrainte énergétique: Exemple

19



Job-shop Flexible sous contrainte énergétique: Quelques résultats

	nbOp	P	Sup	Inf	CPU
Inst_1	12	51	51*		30
		31	62	52	~500
Inst_2	16	57		80	
		37		80	
Inst_3	7	59	55*		11
		39	79	77	~1300
Inst_4	9	54	70*		60
		34		66	
Inst_5	19	40		88	
		30		87	
Inst_6	26	59		43	
		39		41	
Inst_7	14	57	72*		685
		37		69	
Inst_8	9	54	41*		97
		34		37	
Inst_9	12	50	70*		55
		30		70	
Inst_10	13	55	84	69	4400
		35		68	

- 30% d'instances optimales
- 15% d'instances non résolues à l'optimalité
- 55% des instances non résolues

Job-shop Flexible sous contrainte énergétique: Quelques résultats

	nbOp	P	Sup	Inf	CPU
Inst_1	12	51	51*		30
		31	62	52	~500
Inst_2	16	57		80	
		37		80	
Inst_3	7	59	55*		11
		39	79	77	~1300
Inst_4	9	54	70*		60
		34		66	
Inst_5	19	40		88	
		30		87	
Inst_6	26	59		43	
		39		41	
Inst_7	14	57	72*		685
		37		69	
Inst_8	9	54	41*		97
		34		37	
Inst_9	12	50	70*		55
		30		70	
Inst_10	13	55	84	69	4400
		35		68	

- 30% d'instances optimales
- 15% d'instances non résolues à l'optimalité
- 55% des instances non résolues

JOB-SHOP FLEXIBLE SOUS CONTRAINTE ÉNERGÉTIQUE

Job-shop Flexible sous contrainte énergétique: Quelques résultats

20

	nbOp	P	Sup	Inf	CPU
Inst_1	12	51	51*		30
		31	62	52	~500
Inst_2	16	57		80	
		37		80	
Inst_3	7	59	55*		11
		39	79	77	~1300
Inst_4	9	54	70*		60
		34		66	
Inst_5	19	40		88	
		30		87	
Inst_6	26	59		43	
		39		41	
Inst_7	14	57	72*		685
		37		69	
Inst_8	9	54	41*		97
		34		37	
Inst_9	12	50	70*		55
		30		70	
Inst_10	13	55	84	69	4400
		35		68	

- 30% d'instances optimales
- 15% d'instances non résolues à l'optimalité
- 55% des instances non résolues

Job-shop Flexible sous contrainte énergétique: Quelques résultats

	nbOp	P	Sup	Inf	CPU
Inst_1	12	51	51*		30
		31	62	52	~500
Inst_2	16	57		80	
		37		80	
Inst_3	7	59	55*		11
		39	79	77	~1300
Inst_4	9	54	70*		60
		34		66	
Inst_5	19	40		88	
		30		87	
Inst_6	26	59		43	
		39		41	
Inst_7	14	57	72*		685
		37		69	
Inst_8	9	54	41*		97
		34		37	
Inst_9	12	50	70*		55
		30		70	
Inst_10	13	55	84	69	4400
		35		68	

- 30% d'instances optimales
- 15% d'instances non résolues à l'optimalité
- 55% des instances non résolues

Job-shop Flexible sous contrainte énergétique: Quelques résultats

	nbOp	P	Sup	Inf	CPU
Inst_1	12	51	51*		30
		31	62	52	~500
Inst_2	16	57		80	
		37		80	
Inst_3	7	59	55*		11
		39	79	77	~1300
Inst_4	9	54	70*		60
		34		66	
Inst_5	19	40		88	
		30		87	
Inst_6	26	59		43	
		39		41	
Inst_7	14	57	72*		685
		37		69	
Inst_8	9	54	41*		97
		34		37	
Inst_9	12	50	70*		55
		30		70	
Inst_10	13	55	84	69	4400
		35		68	

- 30% d'instances optimales
- 15% d'instances non résolues à l'optimalité
- 55% des instances non résolues

Job-shop Flexible sous contrainte énergétique: Quelques résultats

	nbOp	P	Sup	Inf	CPU
Inst_1	12	51	51*		30
		31	62	52	~500
Inst_2	16	57		80	
		37		80	
Inst_3	7	59	55*		11
		39	79	77	~1300
Inst_4	9	54	70*		60
		34		66	
Inst_5	19	40		88	
		30		87	
Inst_6	26	59		43	
		39		41	
Inst_7	14	57	72*		685
		37		69	
Inst_8	9	54	41*		97
		34		37	
Inst_9	12	50	70*		55
		30		70	
Inst_10	13	55	84	69	4400
		35		68	

- 30% d'instances optimales
- 15% d'instances non résolues à l'optimalité
- 55% des instances non résolues

Job-shop Flexible sous contrainte énergétique: Quelques résultats

	nbOp	P	Sup	Inf	CPU
Inst_1	12	51	51*		30
		31	62	52	~500
Inst_2	16	57		80	
		37		80	
Inst_3	7	59	55*		11
		39	79	77	~1300
Inst_4	9	54	70*		60
		34		66	
Inst_5	19	40		88	
		30		87	
Inst_6	26	59		43	
		39		41	
Inst_7	14	57	72*		685
		37		69	
Inst_8	9	54	41*		97
		34		37	
Inst_9	12	50	70*		55
		30		70	
Inst_10	13	55	84	69	4400
		35		68	

- 30% d'instances optimales
- 15% d'instances non résolues à l'optimalité
- 55% des instances non résolues

Job-shop Flexible sous contrainte énergétique: Quelques résultats

	nbOp	P	Sup	Inf	CPU
Inst_1	12	51	51*		30
		31	62	52	~500
Inst_2	16	57		80	
		37		80	
Inst_3	7	59	55*		11
		39	79	77	~1300
Inst_4	9	54	70*		60
		34		66	
Inst_5	19	40		88	
		30		87	
Inst_6	26	59		43	
		39		41	
Inst_7	14	57	72*		685
		37		69	
Inst_8	9	54	41*		97
		34		37	
Inst_9	12	50	70*		55
		30		70	
Inst_10	13	55	84	69	4400
		35		68	

- 30% d'instances optimales
- 15% d'instances non résolues à l'optimalité
- 55% des instances non résolues

Job-shop Flexible sous contrainte énergétique: Quelques résultats

	nbOp	P	Sup	Inf	CPU
Inst_1	12	51	51*		30
		31	62	52	~500
Inst_2	16	57		80	
		37		80	
Inst_3	7	59	55*		11
		39	79	77	~1300
Inst_4	9	54	70*		60
		34		66	
Inst_5	19	40		88	
		30		87	
Inst_6	26	59		43	
		39		41	
Inst_7	14	57	72*		685
		37		69	
Inst_8	9	54	41*		97
		34		37	
Inst_9	12	50	70*		55
		30		70	
Inst_10	13	55	84	69	4400
		35		68	

- 30% d'instances optimales
- 15% d'instances non résolues à l'optimalité
- 55% des instances non résolues

Job-shop Flexible sous contrainte énergétique: Quelques résultats

	nbOp	P	Sup	Inf	CPU
Inst_1	12	51	51*		30
		31	62	52	~500
Inst_2	16	57		80	
		37		80	
Inst_3	7	59	55*		11
		39	79	77	~1300
Inst_4	9	54	70*		60
		34		66	
Inst_5	19	40		88	
		30		87	
Inst_6	26	59		43	
		39		41	
Inst_7	14	57	72*		685
		37		69	
Inst_8	9	54	41*		97
		34		37	
Inst_9	12	50	70*		55
		30		70	
Inst_10	13	55	84	69	4400
		35		68	

- 30% d'instances optimales
- 15% d'instances non résolues à l'optimalité
- 55% des instances non résolues

Job-shop Flexible sous contrainte énergétique: Quelques résultats

	nbOp	P	Sup	Inf	CPU
Inst_1	12	51	51*		30
		31	62	52	~500
Inst_2	16	57		80	
		37		80	
Inst_3	7	59	55*		11
		39	79	77	~1300
Inst_4	9	54	70*		60
		34		66	
Inst_5	19	40		88	
		30		87	
Inst_6	26	59		43	
		39		41	
Inst_7	14	57	72*		685
		37		69	
Inst_8	9	54	41*		97
		34		37	
Inst_9	12	50	70*		55
		30		70	
Inst_10	13	55	84	69	4400
		35		68	

- 30% d'instances optimales
- 15% d'instances non résolues à l'optimalité
- 55% des instances non résolues

Job-shop Flexible sous contrainte énergétique: Quelques résultats

	nbOp	P	Sup	Inf	CPU
Inst_1	12	51	51*		30
		31	62	52	~500
Inst_2	16	57		80	
		37		80	
Inst_3	7	59	55*		11
		39	79	77	~1300
Inst_4	9	54	70*		60
		34		66	
Inst_5	19	40		88	
		30		87	
Inst_6	26	59		43	
		39		41	
Inst_7	14	57	72*		685
		37		69	
Inst_8	9	54	41*		97
		34		37	
Inst_9	12	50	70*		55
		30		70	
Inst_10	13	55	84	69	4400
		35		68	

- 30% d'instances optimales
- 15% d'instances non résolues à l'optimalité
- 55% des instances non résolues

Job-shop Flexible sous contrainte énergétique: Quelques résultats

	nbOp	P	Sup	Inf	CPU
Inst_1	12	51	51*		30
		31	62	52	~500
Inst_2	16	57		80	
		37		80	
Inst_3	7	59	55*		11
		39	79	77	~1300
Inst_4	9	54	70*		60
		34		66	
Inst_5	19	40		88	
		30		87	
Inst_6	26	59		43	
		39		41	
Inst_7	14	57	72*		685
		37		69	
Inst_8	9	54	41*		97
		34		37	
Inst_9	12	50	70*		55
		30		70	
Inst_10	13	55	84	69	4400
		35		68	

- 30% d'instances optimales
- 15% d'instances non résolues à l'optimalité
- 55% des instances non résolues

JOB-SHOP FLEXIBLE SOUS CONTRAINTE ÉNERGÉTIQUE

Job-shop Flexible sous contrainte énergétique: Quelques résultats

	NbOp	P	SANS ON-OFF			AVEC ON-OFF		
			SUP	INF	CPU	SUP	INF	CPU
Inst_11	12	163	270	229	~120	229	209	~60
		153	319	221	~400	230	210	~2700
Inst_12	14	133		349		565	323	~1200
		123		350			323	
Inst_13	14	141	233*		4700	260	208	~80
		131	268	227	~5000	298	207	~1800
		121		216		312	206	~5500
Inst_14	14	136	224*		90	221*		1100
		126	240*		150	237	220	~5500

JOB-SHOP FLEXIBLE SOUS CONTRAINTE ÉNERGÉTIQUE

Job-shop Flexible sous contrainte énergétique: Quelques résultats

	NbOp	P	SANS ON-OFF			AVEC ON-OFF		
			SUP	INF	CPU	SUP	INF	CPU
Inst_11	12	163	270	229	~120	229	209	~60
		153	319	221	~400	230	210	~2700
Inst_12	14	133		349		565	323	~1200
		123		350			323	
Inst_13	14	141	233*		4700	260	208	~80
		131	268	227	~5000	298	207	~1800
		121		216		312	206	~5500
Inst_14	14	136	224*		90	221*		1100
		126	240*		150	237	220	~5500

JOB-SHOP FLEXIBLE SOUS CONTRAINTE ÉNERGÉTIQUE

Job-shop Flexible sous contrainte énergétique: Quelques résultats

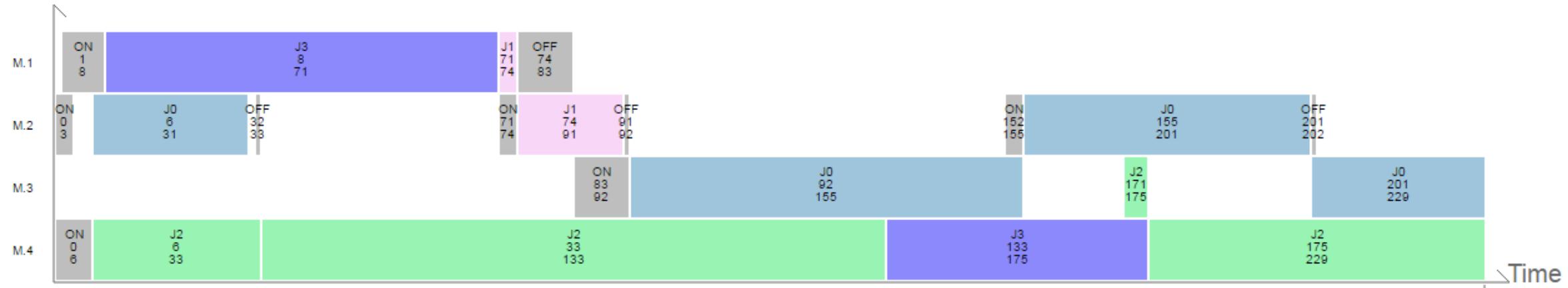
	NbOp	P	SANS ON-OFF			AVEC ON-OFF		
			SUP	INF	CPU	SUP	INF	CPU
Inst_11	12	163	270	229	~120	229	209	~60
		153	319	221	~400	230	210	~2700
Inst_12	14	133		349		565	323	~1200
		123		350			323	
Inst_13	14	141	233*		4700	260	208	~80
		131	268	227	~5000	298	207	~1800
		121		216		312	206	~5500
Inst_14	14	136	224*		90	221*		1100
		126	240*		150	237	220	~5500

JOB-SHOP FLEXIBLE SOUS CONTRAINTE ÉNERGÉTIQUE

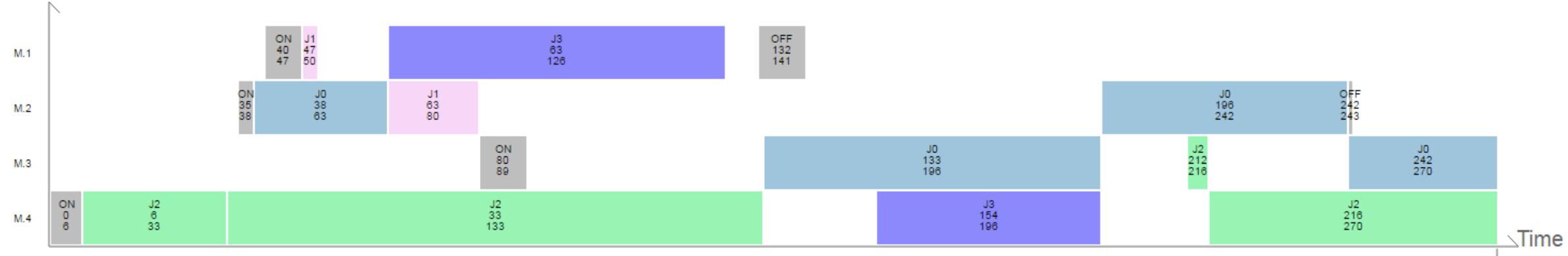
Job-shop Flexible sous contrainte énergétique: Quelques résultats

22

Machines



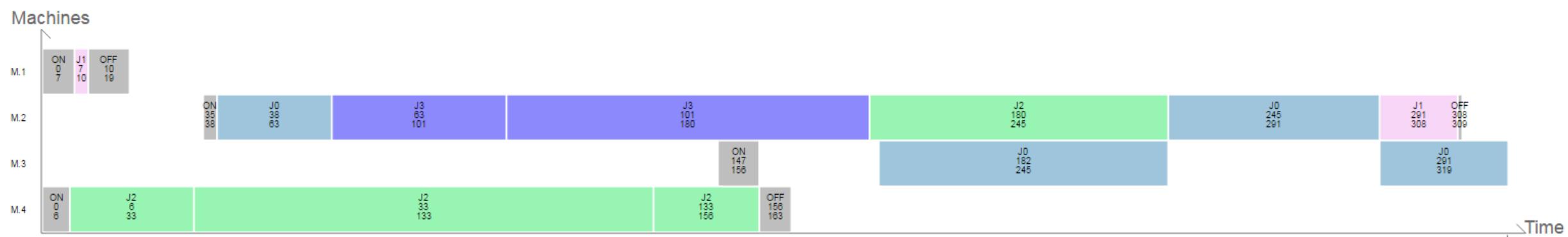
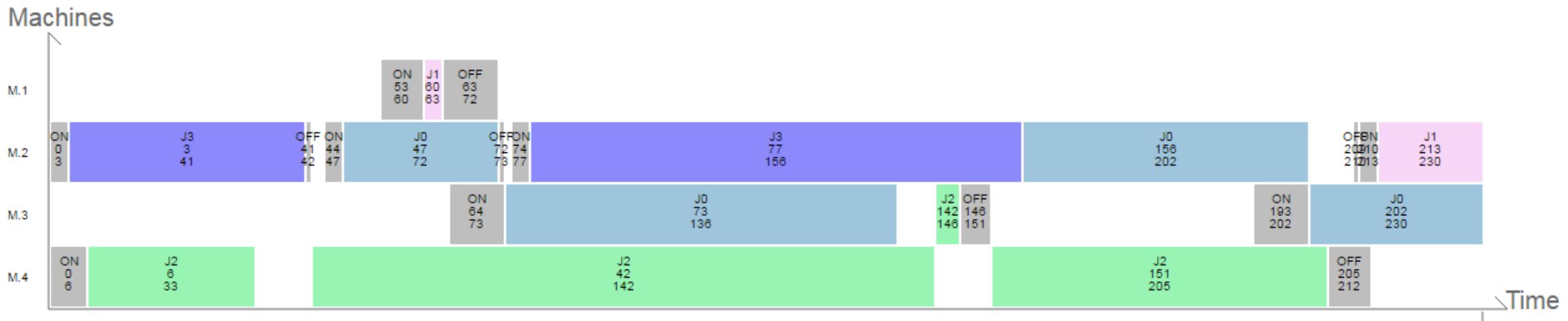
Machines



JOB-SHOP FLEXIBLE SOUS CONTRAINTE ÉNERGÉTIQUE

Job-shop Flexible sous contrainte énergétique: Quelques résultats

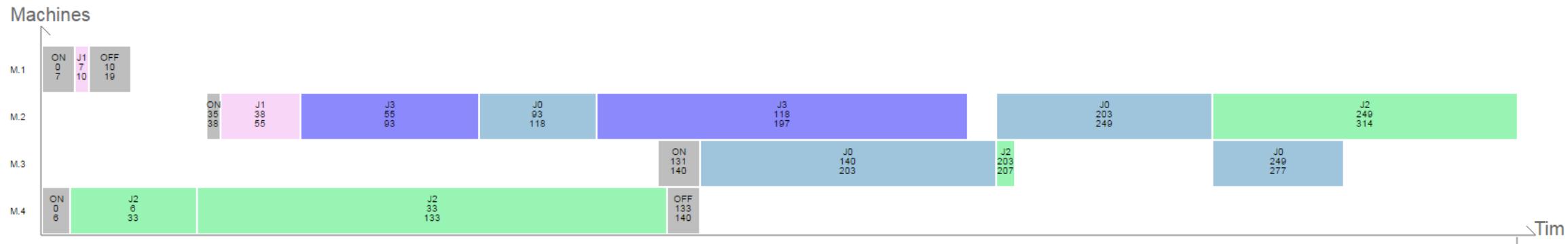
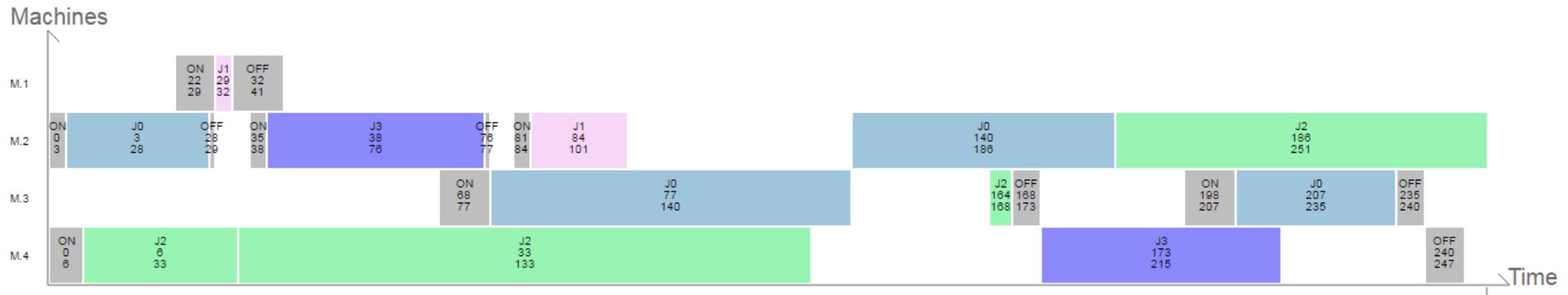
22



JOB-SHOP FLEXIBLE SOUS CONTRAINTE ÉNERGÉTIQUE

Job-shop Flexible sous contrainte énergétique: Quelques résultats

23



Conclusion

- Job-shop Flexible respectant un **seuil de consommation** énergétique
- Prise en compte d'opérations présentant des **pics de consommation**
- **Extinction/allumage** des machines

- Réalisation d'un **modèle linéaire**
- Quelques résultats mais temps de calculs trop importants

- **Perspectives :**
 - Coupes, **CP Optimizer**, ...
 - Instances de grandes tailles / consommations variées -> Métaheuristique
 - Intégrer **plusieurs profils énergétiques** (Rager et al., 2015)
 - Modèle plus complet : **rajouter des considérations financières (TOU)**
 - Modèle mixte : minimiser entrées/sorties (Giret et al., 2015)



Merci pour votre attention