

# Conception d'une ligne d'usinage reconfigurable : étude de cas

MOHAMED ESSAFI<sup>2</sup>, XAVIER DELORME<sup>1</sup>, ALEXANDRE DOLGUI<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Institut Henri Fayol, Ecole Nationale des Mines de Saint-Étienne  
158 Cours Fauriel, 42000, Saint-Étienne, France  
[DELORME@EMSE.FR](mailto:DELORME@EMSE.FR), [DOLGUI@EMSE.FR](mailto:DOLGUI@EMSE.FR)

<sup>2</sup> Université Montpellier 1, Faculté d'Administration Economique et Sociale, AES  
Espace Richter, Avenue Raymond DUGRAND, CS 59640, 34960, Montpellier, Cedex 2, France  
[ESSAFI\\_M\\_BK@YAHOO.FR](mailto:ESSAFI_M_BK@YAHOO.FR)

---

**Résumé** – Dans cet article, nous considérons un problème d'équilibrage de ligne d'usinage reconfigurable. Une approche de résolution basée sur GRASP est proposée. Ce travail a été effectué en collaboration avec PCI SCEMM, leader sur le marché français des systèmes d'usinage. Les caractéristiques techniques de la ligne étudiée sont rapportées ainsi qu'une plateforme d'optimisation mise en place en collaboration avec notre partenaire industriel. Le problème d'optimisation correspondant est un problème d'équilibrage de lignes d'usinage sujet à des contraintes spécifiques. Il consiste à affecter les opérations aux stations de travail en minimisant le coût de la ligne. En plus des contraintes habituelles pour ce type de problème, à savoir : les contraintes de précedence, de temps de cycle, d'inclusion et d'exclusion, nous avons dû considérer des contraintes d'accessibilité. Les stations de travail sont équipées de plusieurs centres d'usinage travaillant en parallèle pour obtenir les volumes de production souhaités. Des temps inter-opérateurs de déplacements et de changement d'outils qui dépendent de la séquence d'opérations sont aussi pris en compte. Nous exposons les solutions fournies par notre algorithme GRASP et nous analysons les principaux enseignements obtenus sur ce cas industriel.

**Abstract** – In this paper, we consider a reconfigurable machining line balancing problem. Solving approach based on GRASP is used to finding compromises between cost and productivity of industrial machining line of spindle heads. This work was done in collaboration with PCI-SCEMM leader on the French market for machining systems. The technical characteristics of the studied line are reported and an optimization platform set up in collaboration with our industrial partner. The corresponding optimization problem is a machining lines balancing problem subject to specific constraints. It consists of assigning operations to workstations with minimal installation costs. In addition to the usual constraints of this type of problem, namely, the precedence, cycle time, inclusion and exclusion constraints, we have considered the constraints of accessibility. The workstations are equipped with several machining centers working in parallel to achieve desired production volumes. Sequence dependent times; i.e., times of movements and changes of tools, are taken into account. We also expose the solutions provided by our GRASP algorithm and we analyze the main lessons obtained from this industrial case.

**Mots clés** – Equilibrage de ligne d'usinage, Temps inter-opérateur, Machines parallèles, GRASP, Path-Relinking.

**Keywords** – Machining line balancing, Setup times, Parallel machines, GRASP, Path-Relinking.

---

## 1 INTRODUCTION

Dans un contexte économique caractérisé par l'incertitude et une concurrence rude, les entreprises fabriquant des systèmes d'usinage se doivent d'être plus réactives et plus innovantes. En effet, les évolutions rapides de la demande rendent de plus en plus difficile la rentabilisation des investissements. Pour cela, ces entreprises s'intéressent à la réduction du cycle de conception de leurs produits, i.e., les lignes et les systèmes d'usinage. La conception d'un système d'usinage prend ainsi une importance majeure. Son objectif principal est de proposer des architectures de systèmes d'usinage qui correspondent au mieux à la demande des clients dans les plus brefs délais, et qui soient moins chères et plus efficaces que celles proposées par la concurrence.

Le problème d'optimisation étudié dans cet article est un problème d'équilibrage de lignes d'usinage [Delorme et al.,

2009]. La spécificité principale des lignes reconfigurables considérées ici vient du fait qu'elles utilisent des stations équipées de plusieurs centres d'usinage (CU) identiques travaillant en parallèle. Notons également qu'en plus des contraintes habituelles pour ce genre de problème, à savoir : les contraintes de précedence, de temps de cycle, d'inclusion et d'exclusion, nous avons à prendre en compte des contraintes d'accessibilité des surfaces de pièces. Deux différents types de centres d'usines sont utilisés dans notre étude : à 4 axes et à 5 axes. Ils n'ont pas les mêmes coûts, mais en même temps, ils n'offrent pas les mêmes possibilités d'accessibilité à la pièce usinée. Enfin, pour ce type de ligne, il est nécessaire de prendre en compte des temps inter-opérateurs de déplacements et de changement d'outils qui dépendent de la séquence d'opérations assignée à la station de travail correspondante (voir la Figure 1).

Notons que nous traitons le cas d'un seul type de produit, i.e.

la ligne est conçue pour un produit et un volume de fabrication connus. L'ensemble d'opérations à assigner représente toutes les opérations qu'il est nécessaire d'exécuter pour fabriquer une pièce de ce produit. Ceci dit, la ligne est reconfigurable [Koren et al., 1999], [Dolgui et Proth, 2006], [Dolgui & Proth, 2010], le passage d'un produit à un autre est facilité par le principe modulaire de la conception de la ligne et par l'utilisation des centres d'usinages à commande numérique. S'il faut passer à un nouveau produit, il suffit de résoudre le même problème pour les nouvelles données. Au cas où la suppression, le déplacement ou l'ajout de nouveaux CU ou de stations de travail ne serait pas possible, ce problème sera résolu avec un nombre fixe de CU et de stations, le principe de résolution étant le même.

Le problème consiste à trouver une séquence d'opérations optimale et une affectation des opérations de cette séquence aux stations de travail, donc par ce biais de déterminer le nombre de stations à installer ainsi que le nombre et le type des centres d'usinage sur chaque station, en respectant toutes les contraintes et en minimisant le coût de la ligne.

Une approche basée sur GRASP (Greedy Randomized Adaptive Search Procedure) combinée à une phase d'intensification utilisant le Path-Relinking est proposée dans cet article pour la résolution d'un cas industriel concret de ce type de problème. Nous suggérons également une approche qui consiste à faire varier le temps de cycle dans un certain intervalle. Cette procédure nous permet d'élargir la recherche pour trouver des solutions qui peuvent être meilleures sachant que le volume de pièces à fabriquer, et donc le cadencement souhaité de la ligne, ne sont jamais connus avec exactitude. Sinon, nous pouvons également tester la possibilité de concevoir plusieurs lignes identiques avec une productivité moindre pour chacune d'elles, si cela s'avère avantageux.

## 2 PROBLEME D'OPTIMISATION

Les lignes d'usinage étudiées sont équipées de centres d'usinage à commandes numériques (CNC machines). En contraste avec les stations des lignes d'usinage dédiées (lignes d'usinage avec boîtiers multi-broches [Belmokhtar, 2006]; [Guschinskaya, 2007]), les CU considérés ici comportent une seule broche et un magasin d'outil.

Dans un CU de ce type, la pièce est fixée sur un plateau rotatif qui permet l'accès à ses différentes faces. Néanmoins, quelque soit le type du plateau rotatif utilisé (le nombre d'axes de rotation) certaines faces restent inaccessibles. Ainsi, des contraintes d'accessibilité doivent être prises en compte en fonction du plateau rotatif sur lequel la pièce est fixée (contraintes machine) et de la face d'appui de la pièce (posage). Il faut également prendre en compte un temps additionnel entre deux opérations consécutives. En effet, dans une séquence d'opérations sur le même CU, le passage d'une opération à une autre nécessite soit un changement d'outil, soit un déplacement d'outil et/ou une rotation de la pièce si les deux opérations ne concernent pas la même face.

Donc, pour résoudre le problème étudié, comme nous l'avons déjà introduit, plusieurs contraintes doivent être prises en compte, notamment : le temps de cycle, les contraintes de précedence entre les opérations, les contraintes d'inclusion et d'exclusion entre les opérations, les contraintes d'accessibilité (contraintes de machine et de posage). Nous connaissons également le nombre de CU à ne pas dépasser par station et le nombre maximum de stations pour la ligne.

Nous avons ainsi un problème d'équilibrage spécifique avec machines parallèles, des temps de changement inter-opérateur

et des contraintes particulières comme celle de posage. La littérature n'est pas très riche concernant les méthodes d'optimisation de problèmes proches. Donnons quelques exemples des publications les plus significatives qui tiennent compte d'une partie ou d'une autre de notre problème.

L'utilisation de machines parallèles dans le problème d'équilibrage de lignes d'assemblage a été introduite par [Buxey, 1974]. Les stations sont des postes de travail installés en parallèle qui exécutent les mêmes opérations. L'utilisation de ce type de lignes présente plusieurs avantages tel que : la réduction du temps mort ou improductif sur les stations, le respect du temps de cycle de la ligne (dans le cas où une ou plusieurs opérations aurait un temps opératoire supérieur au temps de cycle de la ligne), et finalement, la réduction du temps de transport et du flux de matières sur la ligne.

Plusieurs travaux de recherche ont été consacrés à ce problème, notamment : [Pinto et al., 1975] et [Pinto et al., 1981] proposent des méthodes par séparation et évaluation pour la résolution de ce problème. [Bard, 1989] a considéré le problème d'équilibrage avec machines parallèles et temps mort et a proposé un algorithme de programmation dynamique. Le problème d'équilibrage de lignes mixtes (deux produits) a été considéré par [Askin et al., 1997]. Une heuristique d'affectation opération par opération a été proposée. Tandis que [Vilarinho et Simaria, 2006] ont proposé un algorithme de colonie de fourmis.

Dans [Süer, 1998], l'auteur propose une méthode de conception de lignes d'assemblage parallèles où chaque ligne peut contenir des stations parallèles. L'objectif est de minimiser le nombre d'opérateurs. Dans [Gadinov et Wilhelm, 2000], deux cas ont été traités, le premier avec des stations composées de machines parallèles qui effectuent les mêmes opérations et le second avec des affectations imposées dues aux contraintes d'exclusion entre les opérations qui ne peuvent être effectuées sur le même poste. Dans [Bukchin et Rubinovitz, 2002], les auteurs étudient les problèmes de conception des lignes d'assemblages avec choix d'équipement. La possibilité de mettre des machines parallèles sur la même station est prise en compte. Une méthode exacte par séparation et évaluation et une heuristique sont développées. [McMullen et Frazier, 1998] ont développé une méthode approchée pour résoudre un problème d'équilibrage multi-objectif avec machines parallèles et temps opératoires stochastiques.

Le problème d'équilibrage des lignes d'assemblage avec temps de changement a été posé très récemment, et nous n'avons recensé que deux publications à ce sujet. Dans [Scholl et al., 2008], les auteurs définissent ce problème pour les lignes d'assemblage dites simples. Ils proposent un MIP minimisant le nombre total de stations et deux procédures d'optimisation dédiées. [Andrés et al., 2008] proposent un programme en variables mixtes pour le même problème et quelques algorithmes heuristiques.

Nous pouvons donc constater qu'alors que les problèmes d'équilibrage de lignes d'assemblage avec machines parallèles ont été largement étudiés dans la littérature, très peu de travaux de recherche ont été consacrés à l'étude des problèmes d'équilibrage des lignes d'assemblage avec temps inter-opérateurs dépendant de la séquence. Notre problème comporte à la fois ces deux éléments et contient un certain nombre d'autres spécificités expliquées ci-dessus, propres aux systèmes d'usinages. Aucune publication existante, à part nos articles [Delorme et al., 2009] et [Essafi et al., 2010], ne traite ce type de problème.

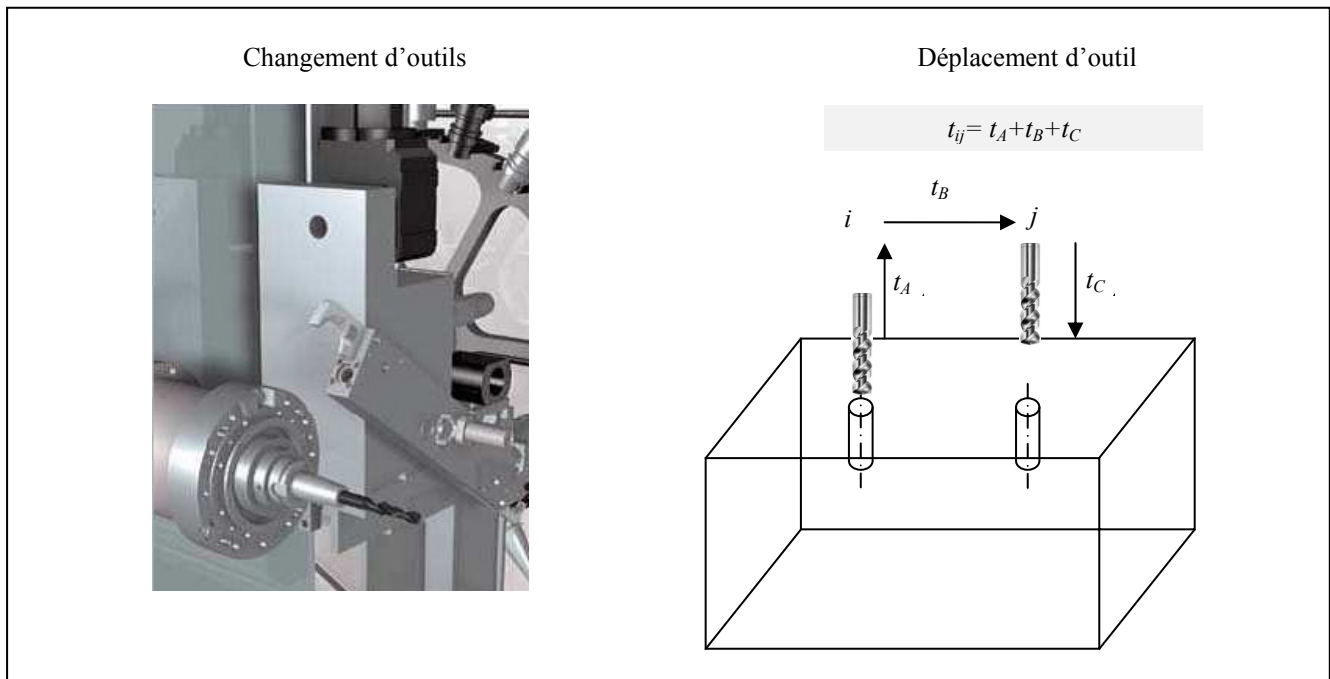


Figure 1. Centre d'usinage mono-broche : temps de changement enter-opérateires

### 3 MODELE MIP DU PROBLEME

Un modèle linéaire en nombres entiers mixtes a été proposé pour ce problème dans [Essafi et al., 2010]. Nous allons le présenter brièvement pour mieux expliquer le problème traité.

Le modèle utilise les variables suivantes :

- *Indices* :  $i$  et  $j$  pour les opérations,  $q$  pour indiquer la position d'une opération dans une séquence d'opérations assignées,  $n$  pour le nombre de machines parallèles à une station,  $k$  pour le numéro de la station,  $a$  pour les posages possibles des pièces dans un centre d'usinage.

- *Données* :

$N$  : ensemble des opérations à assigner ( $i, j = 1, 2, \dots, |N|$ ) ;

$A$  : ensemble des posages de pièce possibles, un seul est choisi pour chaque centre d'usinage et définit les contraintes d'accessibilité des faces à usiner ( $a = 1, \dots, |A|$ ) ;

$l_0$  : nombre maximum d'opérations par station, i.e. chaque station ne peut contenir plus de  $l_0$  opérations ;

$n_0$  : nombre maximum de CU par station ;

$m_0$  : nombre maximum de stations ;

$q_0 = l_0 \cdot m_0$  : le nombre maximum de places dans une séquence d'affectation d'opérations ;

$t_i$  : temps de l'opération  $i$  ( $i = 1, \dots, |N|$ ) ;

$t_{ij}$  : temps de changement (temps inter-opérateur) quand l'opération  $j$  est effectué directement après l'opération  $i$  ;

$T_0$  : temps de cycle souhaité de la ligne (*takt time*) ;

$A(i)$  : ensemble de tous les posages de la pièce avec lesquels l'exécution de l'opération  $i$  est possible ;

$C_m(a)$  : coût d'un CU permettant le posage  $a$  ;

$P_i$  : ensemble des prédécesseurs directs de l'opération  $i$  ;

$ES$  : collection de  $e \subset N$  où  $e$  est un ensemble d'opérations devant impérativement être assignées sur la même station ;

$\overline{ES}$  : ensemble de couples d'opérations  $(i, j)$  où  $i$  et  $j$  doivent être assignées sur des stations différentes, i.e. on ne doit pas assigner  $i$  et  $j$  sur la même station ;

$S(k)$  : ensemble des indices de toutes les places pour les opérations de la station  $k$  :  $S(k) = \{l_0 \cdot (k-1) + 1, l_0 \cdot (k-1) + 2, \dots, l_0 \cdot k\}$ ;  $\forall k = 1, 2, \dots, m_0$  ;

$K(i)$  : ensemble des stations candidates pour l'opération  $i$ ,  $K(i) \subseteq \{1, 2, \dots, m_0\}$ , i.e. il est impossible d'assigner l'opération  $i$  ailleurs vu les contraintes du problème ;

$Q(i)$  : ensemble des places possibles, dans la séquence de toutes les opérations, pour l'affectation de l'opération  $i$ ,  $Q(i) \subseteq \{1, 2, \dots, l_0 m_0\}$  ;

$N(k)$  : ensemble des opérations qui peuvent être assignées à la station  $k$  ;

$M(q)$  : ensemble des opérations qui peuvent être assignées à la place  $q$  dans la séquence d'affectation ;

$E_i$  : station au plus tôt pour l'opération  $i$  ;

$L_i$  : station au plus tard pour l'opération  $i$ .

Notez que  $K(i)$ ,  $Q(i)$ ,  $N(k)$ ,  $M(q)$ ,  $E_i$  et  $L_i$ , pour tous les  $i$ ,  $q$  et certains autres éléments du modèle peuvent être « pré-optimisés » dans une procédure de prétraitement des contraintes [Delorme et al., 2009], [Essafi et al., 2010].

*Variables* :

$x_{iq} = 1$ , si l'opération  $i$  est assignée à la place  $q$  ( $q$  est son numéro d'ordre dans la séquence d'affectation),  $x_{iq} = 0$ , sinon ;

$y_{nk} = 1$ , si on décide de mettre  $n$  centres d'usinage en parallèle à la station  $k$ , 0 sinon ;

$z_{ka} = 1$ , si la station  $k$  utilise le posage  $a$ , 0 sinon ;

$\tau_q$  : le temps de changement (setup) nécessaire entre l'opération dont la place est  $q$  et celle de  $q+1$  ;

$\rho_k$  : le coût de la station  $k$ .

La fonction objective (1) minimise le coût total de la ligne :

$$\text{Minimiser } \sum_{k=1}^{m_0} \rho_k \quad (1)$$

La contrainte (2) vérifie qu'il y ait qu'une seule valeur assignée pour le nombre de CU à chaque station :

$$\sum_{n=1}^{n_0} y_{nk} \leq 1, \forall k = 1, 2, \dots, m_0 \quad (2)$$

L'expression (3) assure qu'il n'y ait pas de stations vides (on ouvre une station uniquement si la station précédente est déjà ouverte) :

$$\sum_{n=1}^{n_0} y_{nk} \geq \sum_{n=1}^{n_0} y_{n(k+1)}, \forall k = 1, \dots, m_0 - 1 \quad (3)$$

La contrainte (4) vérifie que l'opération  $i$  ne soit assignée qu'une seule fois et ceci pour toutes les opérations :

$$\sum_{q \in Q(i)} x_{iq} = 1, \forall i \in N \quad (4)$$

Dans la séquence d'affectation, chaque place est occupée par une seule opération :

$$\sum_{i \in M(q)} x_{iq} \leq 1, \forall q = 1, 2, \dots, q_0 \quad (5)$$

L'expression (6), utilisée pour  $\forall k = 1, 2, \dots, m_0$ , assure qu'il n'ait pas de places vides dans la séquence. Une opération est assignée à une place si la place précédente dans la séquence est déjà occupée par une autre opération, si la place précédente est vide, on interdit cette affectation :

$$\sum_{i \in M(q)} x_{iq} \geq \sum_{p \in S(k); p > q} \sum_{i \in M(p)} x_{ip}, \forall q \in S(k) \setminus \max\{S(k)\}, \quad (6)$$

La contrainte (7) impose le choix d'un seul posage de pièces par station :

$$\sum_{a \in A} z_{ka} \leq 1, \forall k = 1, 2, \dots, m_0 \quad (7)$$

L'expression (8) vérifie l'accessibilité des faces de pièces (le posage choisi pour une station permet d'effectuer sur cette station toutes les opérations pour lesquelles ce posage est autorisé):

$$\sum_{q \in S(k)} x_{iq} \leq \sum_{a \in A(i)} z_{ka}, \forall k \in K(i), \forall i \in N \quad (8)$$

La contrainte (9) définit le temps de changement entre l'opération  $i$  et l'opération  $j$ , quand l'opération  $j$  est exécutée directement après l'opération  $i$  sur la même station:

$$\tau_q \geq \sum_{j \in M(q+1) \setminus \{i\}} t_{ij} \cdot (x_{iq} + x_{j(q+1)} - 1), \quad (9)$$

L'équation (10) vérifie la contrainte de temps de cycle en tenant compte du nombre de CU sur chaque station. Cette expression doit être valide pour  $\forall k = 1, 2, \dots, m_0$  :

$$\sum_{q \in S(k) \setminus \max\{S(k)\}} \tau_q + \sum_{i \in N(k)} \sum_{q \in S(k)} t_i \cdot x_{iq} \leq T_0 \cdot \sum_{n=1}^{n_0} n \cdot y_{nk} \quad (10)$$

L'expression (11) définit les contraintes de précédence entre les opérations :

$$1 + \sum_{q \in Q(j)} q \cdot x_{jq} \leq \sum_{q \in Q(i)} q \cdot x_{iq}, \forall i \in N, \forall j \in P_i \quad (11)$$

La contrainte (12) donne les relations d'exclusion entre les opérations, elle doit être valide pour  $\forall k \in K(i) \cap K(j)$  :

$$\sum_{q \in S(k) \cap Q(i)} x_{iq} = \sum_{q \in S(k) \cap Q(j)} x_{jq}, \forall i, j \in e, \forall e \in ES \quad (12)$$

L'expression (13) donne les contraintes d'exclusion :

$$\sum_{q \in S(k)} (x_{iq} + x_{jq}) \leq 1, \forall (i, j) \in \overline{ES}, \forall k \in K(i) \cap K(j) \quad (13)$$

L'expression (14) calcule, pour  $\forall k = 1, \dots, m_0$ , le coût de la station  $k$  en fonction du posage choisi :

$$\rho_k \geq C_m(a) \cdot \left( \sum_{n=1}^{n_0} n \cdot y_{nk} - n_0(1 - z_{ka}) \right), \forall a \in A \quad (14)$$

Les expressions (15)–(19) donnent des contraintes complémentaires sur les valeurs des variables utilisées :

$$0 \leq \tau_q \leq \max_{i, j; i \neq j} (t_{ij}), \forall q = 1, 2, \dots, q_0 \quad (15)$$

$$x_{iq} \in \{0, 1\}, \forall i \in N, \forall q \in Q(i) \quad (16)$$

$$y_{nk} \in \{0, 1\}, \forall n = 1, 2, \dots, n_0, \forall k = 1, 2, \dots, m_0 \quad (17)$$

$$z_{ka} \in \{0, 1\}, \forall k = 1, 2, \dots, m_0, \forall a \in A \quad (18)$$

$$\rho_k \geq 0, \forall k = 1, \dots, m_0 \quad (19)$$

Les différentes contraintes et spécificités du problème ont été prises en compte dans ce modèle. L'objectif est la minimisation du coût total de la ligne. Notons quand même qu'en fonction du cas traité, plusieurs autres critères peuvent être utilisés, ceux-ci s'appuient essentiellement sur des combinaisons ou des compromis entre les éléments suivants :

- Nombre de machines ;
- Nombre de stations ;
- Équilibrage de la charge entre les stations de la ligne ;
- Temps de cycle de la ligne (ou productivité).

Ce modèle donne une solution exacte du problème posé. Mais comme le témoigne notre article [Essafi et al., 2010], il ne peut pas être utilisé pour des cas de grandes tailles, car un problème de taille avec plus de 100 opérations nécessiterait un temps de calcul prohibitif, même en utilisant des techniques de prétraitement pour réduire les intervalles des valeurs possibles pour les indices dans les expressions ci-dessus [Delorme et al., 2009].

#### 4 APPROCHE DE RESOLUTION

Dans cette section, nous présentons l'approche d'optimisation utilisée qui est basée sur la méthode GRASP (Greedy Randomized Adaptive Search Procedure) combinée à une phase d'intensification utilisant le Path-Relinking. GRASP est une métaheuristique développée par [Feo et Resende, 1989] qui a été appliquée avec succès pour la résolution de nombreux problèmes d'optimisation (voir [Resende et al., 2006]) et notamment pour des problèmes d'équilibrage de lignes d'assemblage dans [Andrés et al., 2008] et [Guschinskaya et al., 2008]. Un algorithme GRASP basique est une procédure de recherche locale multi-départ. Il est composé de deux phases : une phase de construction de solutions, et une phase d'amélioration.

La première phase consiste à générer des solutions admissibles à l'aide d'un algorithme glouton aléatoire. Un paramètre de sélection aléatoire est utilisé afin de générer une famille de solutions différentes qui nous permet d'explorer mieux l'espace de solutions. La deuxième phase est une procédure de recherche locale qui permet d'améliorer la qualité des solutions obtenues en étudiant leur voisinage.

Au schéma de base de GRASP, nous avons ajouté une procédure d'auto-adaptation basée sur les idées de Reactive GRASP, voir [Delmaire et al., 1999] et [Prais et Ribeiro,

2000]. Cette procédure ajuste le paramètre aléatoire de l'algorithme en fonction de la qualité des solutions générées. La deuxième amélioration de l'algorithme consiste en une phase d'intensification basée sur le Path-Relinking. La procédure du Path Relinking a été initialement proposée par [Glover, 1996] comme une stratégie d'intensification explorant les trajectoires qui connectent les meilleures solutions obtenues par la recherche tabou ou Scatter Search [Glover et al., 2000].

[Laguna et Marti, 1999] ont été les premiers à combiner un algorithme GRASP avec Path-Relinking. Cette combinaison a été utilisée avec succès pour la résolution de plusieurs problèmes complexes d'optimisation, voir par exemple, [Delorme et al., 2004], [Boudia et al., 2007], [Alvarez-Valdes et al., 2008] et [Resende et al., 2010].

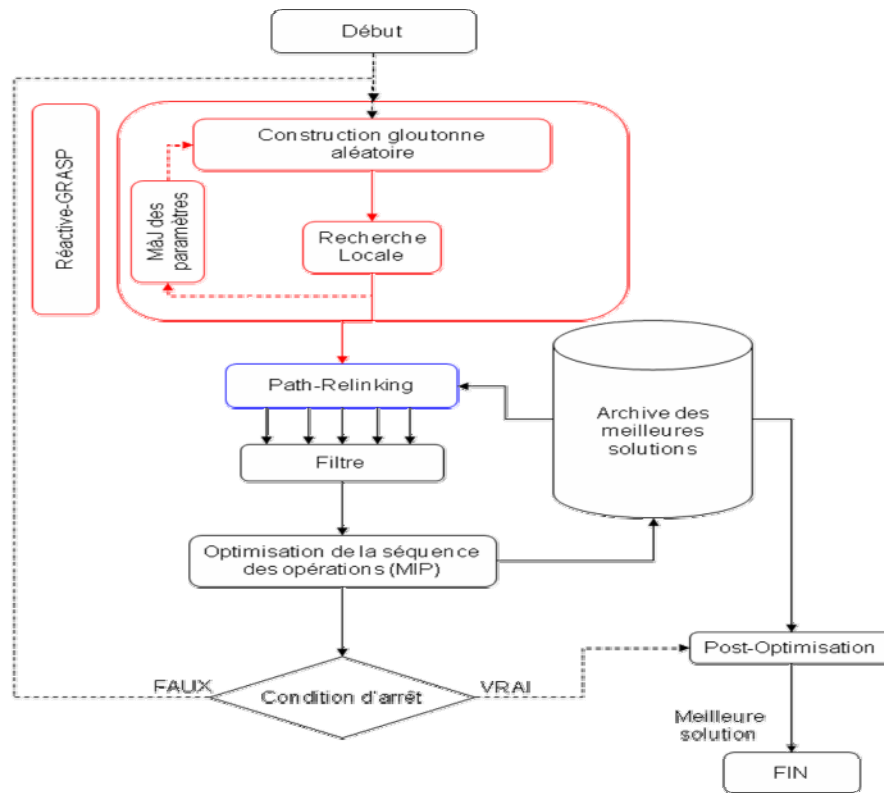


Figure 2. Schéma général de l'approche basée sur GRASP

Résolution								
N° Outil	N° Fonction	commentaire	Type usinage	Direction usinage	Type Posage (prendre en compte les précédentes des)	Tps VA en 1/100mn.	Précédence	Usage sur même machine (inclusion)
T001	F100.01	palpage touchots	CME	100	1	12		
T002	F100.02	ebauche face comb	UFA	100	1	31	F100.01	F100.01
T002	F200.01	ebauche face AAC sup	UFA	200	1,2	20	F100.02	
T002	F200.02	ebauche face AAC inf	UFA	200	1,2	22	F100.02	
T003	F200.03	Barettes coté AAC	UFA	200	1,2	17	x	
T003	F100.03	Barettes coté comb	UFA	100	1,2	25	x	
T004	F100.04	pointage fix culasse	UPA	100	1	4	F100.02	
T004	F100.05	pointage fix culasse	UPA	100	1	15	F100.02	
T005	F100.06	perçage fix culasse (eb-DU)	UPA	100	1	10	F100.04	
T005	F100.07	perçage fix culasse	UPA	100	1	24	F100.05	
T006	F100.08	Alésage finition DU	UAA	100	1	12	F100.06	
T007	F100.09	perçage-alesage_locating transport	UAA	100	1	5	F100.08	
T007	F100.10	perçage fix patte	UPA	100	1,2	3	F100.08	
T007	F200.04	perçage-alesage_locating MPP	UAA	200	1	5	F100.08	
T008	F200.05	lamage passage vis fix	UPA	200	1,2,5,11,15	24	06-F100.07-FC100.08	
T009	F200.06	passage clé vis fix	UPA	200	1	14	x	
T010	F200.07	Ebauche palier 4 adm et ech	UFA	200	1,2,5,11	11	F100.08	
T011	F200.08	Ebauche palier 1,2,3 adm et ech	UFA	200	1,2,5,11	11	F100.08	
T012	F200.09	Alésage eb. Puit de bougie	UAA	200	1,2,5,11,15	13	F100.08	
T013	F450.01	fraisage Face Admission	UFA	450	1,2,5,11,15	4,5	F100.08	
T013	F300.01	fraisage Face Echappement	UFA	300	1,2,5,11,15	2,5	F100.08	

Figure 3. Aperçu de l'interface de résolution

L'approche générale d'optimisation est résumée dans la Figure 2. Les lignes continues désignent les flux de solutions et les lignes discontinues désignent une prise de décision ou une mise à jour des paramètres. Cette procédure est itérative, elle est répétée jusqu'à ce qu'une condition d'arrêt soit vérifiée (nombre d'itérations, temps de calcul, qualité de solution, niveau d'amélioration par itération, etc.). Les meilleures solutions sont stockées dans une archive au fur et à mesure de l'avancement des itérations. Avant l'archivage des solutions, nous utilisons un autre modèle linéaire en variables mixtes pour optimiser les séquences d'opérations dans les stations. Le Path-Relinking est appliqué de façon périodique (après un nombre fixe d'itérations) sur les meilleures solutions de l'archive et, à la fin des itérations, sur toutes les solutions archivées. Les différentes composantes de l'approche proposée sont détaillées dans ce qui suit.

*Centres d'usinage 4-axes* : c'est un CU qui permet au porte-outil d'accéder à 4 faces différentes d'une pièce grâce à un seul axe de rotation.

*Centres d'usinage 5-axes* : c'est un centre d'usinage 4-axes amélioré par l'ajout d'un plateau rotatif suivant un deuxième axe. Cela permet d'avoir deux axes de rotations, et donc d'accéder aux faces latérales inaccessibles, mais supprime toute possibilité d'accès à la face d'appui. Il permet aussi l'usinage des opérations en double inclinaison. Ces machines sont plus coûteuses que les CU 4-axes, ce qui rend leur utilisation limitée au seul cas de nécessité (opérations inaccessibles avec une machine 4-axes) ou pour la recherche d'une meilleure productivité.

Quatre posages différents sont possibles pour l'exécution des différentes opérations dont un qui nécessite une machine 5-axes. Le nombre maximal de CU par station a été fixé à 10.

## 5 CAS D'ETUDE INDUSTRIEL

Dans le cadre de la collaboration entre l'Institut Henri Fayol de l'Ecole Nationale Supérieure des Mines de Saint-Étienne et l'entreprise PCI -SCEMM (groupe PSA Peugeot Citroën), nous avons travaillé sur un cas industriel de ligne d'usinage de culasses. Une interface de résolution développée sur Excel et faisant appel à la méthode de résolution algorithmique proposée dans cet article a été mise en place (Figure 3). Cette interface contient toutes les informations du processus d'usinage : opérations d'usinage, temps opératoires, procédure de calcul des temps inter-opératoires, relations de précédence, relations d'inclusion et d'exclusion, contraintes d'accessibilité (posages). Par un simple clic, cette interface permet de faire appel à des méthodes de résolution grâce à une macro VBA.

Le cas d'étude présenté ici comporte 119 opérations à exécuter. Nous considérons les contraintes de précédence, d'inclusion, d'exclusion et de posage. La spécificité de ce cas est l'utilisation de deux types de centres d'usinage : centres d'usinage 4-axes et centres d'usinage 5-axes fabriqués par PCI-SCEMM (Météors).

## 6 EXPERIMENTATIONS

Nous avons donc traité ce cas en utilisant l'approche basée sur GRASP. La fonction objectif à minimiser devait en outre prendre en compte les coûts de deux types de centres d'usinage susceptibles d'être utilisés (CU 4-axes et CU 5-axes). Afin de mieux appréhender les différentes configurations possibles pour ce système, nous avons appliqué notre méthode d'optimisation en variant le temps de cycle imposé de la ligne de 50 à 500 unités de temps avec un pas de 25. En effet, il n'était pas exclu a priori de réaliser plusieurs lignes identiques en parallèle, chacune avec un temps de cycle plus important, si cette dernière solution s'avérait intéressante. Dans le Tableau 1, nous présentons les meilleures solutions trouvées pour les temps de cycle différents. Nous précisons le temps de cycle effectif de la ligne, le nombre de CU et de stations ainsi que le nombre de CU 5-axes installés sur la ligne, les autres étant des CU 4-axes (nous pouvons remarquer que, parmi les solutions générées, aucune n'a un temps de cycle effectif compris entre 317 et 394 unités de temps). L'objectif de notre étude pour ce cas précis consiste à chercher un compromis entre le temps de cycle de la ligne et son coût.

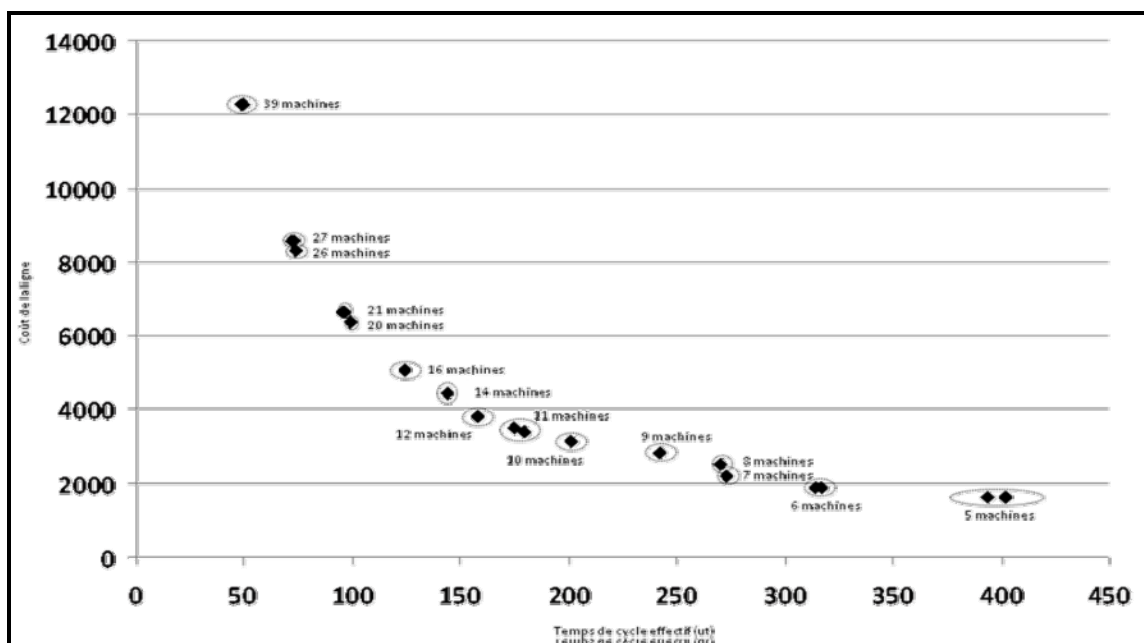


Figure 4. Variation du coût de la ligne en fonction du temps de cycle effectif



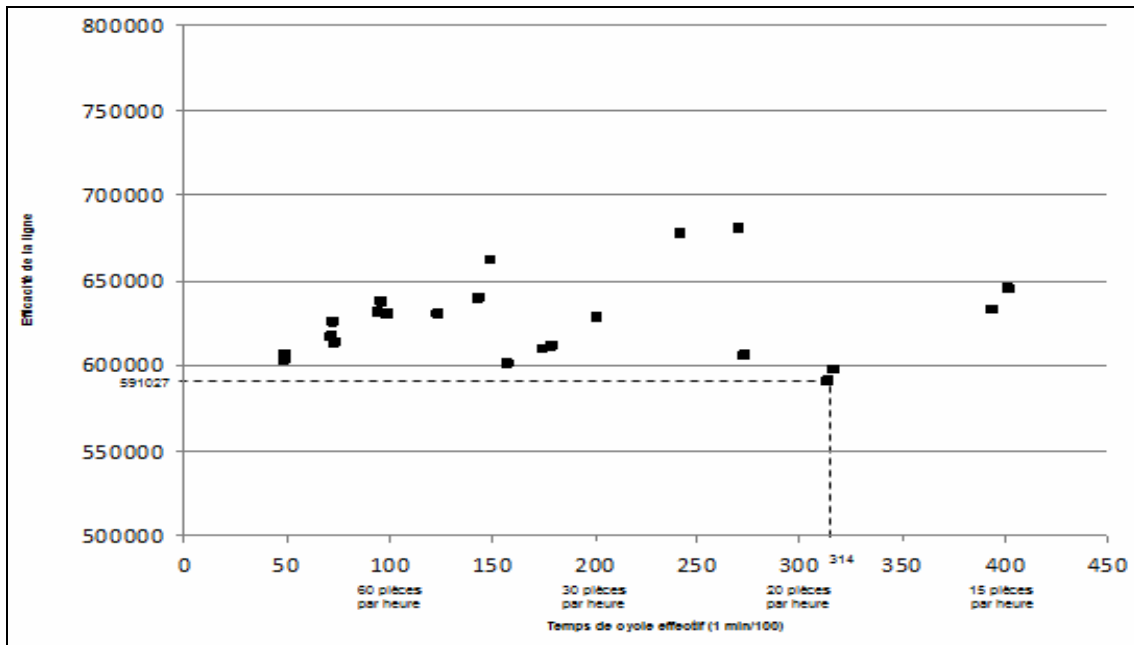


Figure 5. Efficacité des différentes solutions potentiellement efficaces obtenues

Tableau 1. Solutions par temps de cycle

Coût	Temps de cycle effectif	Nombre stations	Nombre CUs	Nombre CUs 5-axes	Efficacité
12297,71	49	27	39	4	602588
12257,07	49,5	26	39	4	606725
8565,65	72	20	27	3	616727
8283,78	74	20	26	3	613000
6639,78	95	16	21	2	630779
6640,05	96	15	21	3	637445
6358	99	15	20	2	629442
5083,09	124	12	16	2	630303
4437,02	144	10	14	1	638931
3805,37	158	9	12	1	601248
3483,52	175	8	11	1	609616
3402,61	179,5	7	11	1	610768
3122,6	201	8	10	1	627643
2800,01	242	6	9	1	677602
2520,9	270	6	8	1	680643
2218,97	273	6	8	1	605779
1882,25	314	5	6	1	591027
1605,08	394	5	5	1	632402
1604,27	402	5	5	1	644917

Dans la Figure 4, nous présentons l'évolution du coût des solutions générées en fonction du temps de cycle effectif. Cette courbe nous permet d'avoir une vue d'ensemble sur la combinaison coût de la ligne (ou nombre de CU)/temps de cycle. La méthode de résolution utilisée n'étant pas exacte, il s'agit donc d'une approximation du front Pareto. Une autre manière intéressante d'analyser les résultats, consiste à considérer la notion d'efficacité utilisée dans les problèmes d'équilibrage de lignes d'assemblage. Minimiser l'efficacité signifie maximiser le rendement réalisé avec le minimum de moyens. L'efficacité d'une ligne est calculée par la multiplication de son coût par son temps de cycle. Ainsi, minimiser ce terme revient à minimiser le coût unitaire du produit. Pour un concepteur, cette information peut être intéressante quand il y a une possibilité de faire des lignes parallèles.

Dans la Figure 5, nous présentons la variation de l'efficacité en fonction du temps de cycle effectif. La meilleure efficacité correspond à un temps de cycle égal à 314 unités de temps. Dans ce cas, il paraît plus intéressant de considérer deux lignes

avec un temps de cycle de 314 que la solution correspondant à une ligne unique avec un temps de cycle de 158.

Il peut aussi être utile d'observer les effets de seuil et l'impact très important que peut parfois avoir une faible variation du taux de productivité sur le coût de la ligne et inversement. Sachant que pour des études en avant projet, une marge de sécurité importante est souvent appliquée au temps de cycle souhaité pour se prémunir contre des évolutions du produit, des imprécisions ou encore des aléas liés à la variabilité de la production ou des marchés, ce type d'information peut permettre de justifier une étude plus approfondie de configurations avec des marges plus faibles, si cela peut diminuer sensiblement le coût de la ligne.

## 7 CONCLUSION

Dans cet article, nous avons présenté un problème industriel intéressant qui est lié à la conception des lignes d'usinage reconfigurables en avant-projet.

Nous avons montré qu'il s'agit d'un nouveau problème d'équilibrage de lignes avec machines parallèles et temps de changement dépendant de la séquence d'opérations et avec des contraintes particulières de l'environnement d'usinage.

Nous avons présenté un modèle MIP de ce problème pour mieux l'expliquer. Ensuite, nous avons proposé une approche heuristique pour sa résolution qui utilise la méthode GRASP combinée au Path-Relinking.

Nous avons illustré cette heuristique par une application industrielle concrète que nous avons réalisée pour PCI-SCHEMM. Un cas industriel est ainsi présenté et les résultats pour différentes configurations possibles rapportés. Nous avons ainsi fait varier le temps de cycle, pour voir toutes les possibilités d'amélioration du coût unitaire de fabrication d'une pièce. Ces résultats permettent d'illustrer le type d'information qu'il est possible d'obtenir en variant la cadence souhaitée de la ligne.

La résolution du problème industriel s'est basée sur la recherche d'un compromis entre le coût de la ligne et le taux de production. La définition et la prise en compte d'un ou

plusieurs indicateurs quantitatifs pour évaluer le degré de reconfigurabilité de la ligne d'usinage nous paraissent être des perspectives importantes. L'application de l'approche au cas d'une reconfiguration est une autre piste de notre future recherche.

## 8 REMERCIEMENTS

Nous remercions la société PCI-SCHEM pour son aide et sa collaboration dans ce travail.

## 9 REFERENCES

- Andrés, C., C. Miralles, Pastor, R., (2008) Balancing and scheduling tasks in assembly lines with sequence-dependent setup times. *European Journal of Operational Research*, 187, pp. 1212–1223.
- Askin, R.G. et M. Zhou, (1997). A parallel station heuristic for the mixed-model production line balancing problem. *International Journal of Production Research*, 35(11), pp. 3095-3105.
- Bard, J.F., (1989). Assembly line balancing with parallel workstations and dead time. *International Journal of Production Research*, 27(6), pp. 1005-1018.
- Belmokhtar, S., (2006) Lignes d'usinage avec équipements standards: modélisation, configuration et optimisation. Thèse de doctorat, Ecole des Mines de Saint-Etienne, France.
- Boudia, M., Louly, M.A.O., Prins, C., (2007) A reactive GRASP and path relinking for a combined production-distribution problem. *Computer and Operations Research*, 34, pp. 3402-3419.
- Buxey, G.M., (1974). Assembly line balancing with multiple stations. *Management Science*, 20, pp. 1010-1021.
- Bukchin J., & Rubinovitz, A., (2002). A weighted approach for assembly line designing with station paralleling and equipment selection, *IIE Transactions*, 35, pp. 73-85.
- Delmaire, H., Diaz, J.A., Fernandez, E., Ortega, M., (1999) Reactive GRASP and tabu search based heuristics for the single source capacitated plant location problem. *Information Systems and Operational Research*, 37(3), pp. 194-225.
- Delorme, X., Dolgui, A., Essafi, M., Linxe L., and Poyard, D., (2009) Machining Lines Automation. Part D, Chapter 35 in: Springer Handbook of Automation, S.Y. Nof (Ed.), with DVD-ROM, Springer, ISBN: 978-3-540-78830-0, p. 599 - 618.
- Delorme, X., Gandibleux, X., Rodriguez, J., (2004) GRASP for set packing problems. *European Journal of Operational Research*, 153, pp. 564-580.
- Dolgui, A., Proth, J.-M., (2006) Les systèmes de production modernes, en 2 volumes, Hermès science.
- Dolgui, A., Proth, J.-M. (2010). Supply chain engineering, Springer.
- Essafi, M., Delorme, X., Dolgui A. et Guschinskaya, O., (2010). A MIP approach for balancing transfer line with complex industrial constraints. *Computers & Industrial Engineering*, 58(3), pp. 393-400.
- Feo, W.E. et Resende, M.G.C., (1989) A probabilistic heuristic for a computationally difficult set covering problem, *Operations Research Letter*, 8, pp. 67-71.
- Gadidov, R., Wilhelm, W.E., (2000) A cutting plane approach for the single-product assembly system design problem. *International Journal of Production Research*, 38, pp. 1731-1754
- Glover, F., (1996) Tabu search and adaptive memory programming - Advances, applications and challenges. In: Barr, R.S., Helgason, R.V. et Kennington, J.L., eds., *Interfaces in Computer Science and Operations Research*, Kluwer, pp. 1-75.
- Glover, F., Laguna, M., Marti, R., (2000) Fundamentals of scatter search and path relinking. *Control and Cybernetics*, 39, pp. 653-684.
- Guschinskaya, O., (2007). Outils d'aide à la décision pour la conception en avant-projet des systèmes d'usinage à boîtiers multi-broches. Thèse de doctorat, Ecole des Mines de Saint Etienne, France.
- Guschinskaya, O., Dolgui, A., Guschinsky, N., Levin, G., (2008) A heuristic multi-start decomposition approach for optimal design of serial machining lines. *European Journal of Operational Research*, 189(3), pp. 902-913.
- Koren, Y., Heisel, U., Javane, F., Moriwaki, T., Protchow, G., Van Brussel, H., & Ulsoy, A.G., (1999) Reconfigurable manufacturing systems, *CIRP Annals*, 48(2), pp. 527-598.
- Laguna, M., Marti, R., (1999) GRASP and Path Relinking for 2-Layer Straight Line Crossing Minimization. *INFORMS Journal on Computing*, 11(1), pp. 44-52.
- McMullen, P.R. et Frazier, G.V., (1998). Using simulated annealing to solve a multiobjective assembly line balancing problem with parallel workstations. *International Journal of Production Research*, 39(10), pp. 2717-2741.
- Pinto, P.A., Dannenbring, D.G. et Khumawala, B.M., (1975) A branch and bound algorithm for assembly line balancing with paralleling. *International Journal of Production Research*, 13(2), pp. 183-196.
- Pinto, P.A., Dannenbring, D.G. et Khumawala, B.M., (1981). Branch and bound and heuristic procedures for assembly line balancing with paralleling of stations. *International Journal of Production Research*, 19(5), pp. 565-576.
- Prais, M., Ribeiro, C.C., (2000) Reactive GRASP: an application to a matrix de composition problem in TDMA traffic assignment. *INFORMS Journal on Computing*, 12(3), pp. 164-176.
- Resende, M.G.C., Ribeiro, C.C., (2006) Greedy Randomized Adaptive Search Procedures: advances and applications. In: Potvin J.Y., and Gendriaux, M., eds, *International Series in Operations Research & Management Science, handbook of meta-heuristics*, 57, pp. 219-249.
- Scholl, A., Boysen, N., Flidner, M., (2008) The sequence-dependent assembly line balancing problem. *OR Spectrum*, 30(3), pp. 579-609.
- Süer, G.A., (1998) Designing parallel assembly lines. *Computers and Industrial Engineering*, 35 (3-4), pp. 467-470.
- Vilarinho, P.M. et Simaria, A.S., (2002). A two-stage heuristic method for balancing mixed-model assembly lines with parallel workstations. *International Journal of Production Research*, 40, pp. 1405-1420.