



HAL
open science

Équilibrage de lignes de production : état de l'art

Olga Battaïa, Alexandre Dolgui

► **To cite this version:**

Olga Battaïa, Alexandre Dolgui. Équilibrage de lignes de production : état de l'art. Journal Européen des Systèmes Automatisés (JESA), 2010, 44 (9-10), pp.1079-1118. 10.3166/jesa.44.1079-1117 . emse-00676018

HAL Id: emse-00676018

<https://hal-emse.ccsd.cnrs.fr/emse-00676018>

Submitted on 3 Nov 2022

HAL is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.



Distributed under a Creative Commons Attribution - NonCommercial 4.0 International License

Équilibrage de lignes de production : état de l'art

Olga Guschinskaya* — **Alexandre Dolgui***

* *Centre G2I, Ecole Nationale Supérieure des Mines de Saint-Etienne
158 Cours Fauriel, 42023 Saint-Etienne, Cedex 2
{guschinskaya, dolgui}@emse.fr*

RÉSUMÉ. Dans cet article, nous présentons une analyse des avancées récentes dans la modélisation et la résolution des problèmes d'équilibrage de lignes de production. Face à un marché en pleine mutation, la structure et la configuration des lignes changent. Ceci fait apparaître de nouveaux problèmes d'optimisation. Nous analysons les nouveaux modèles mathématiques des différents éléments d'une ligne de production, à savoir : le processus de fabrication, les ressources, les contraintes technologiques et les critères utilisés pour évaluer la qualité des solutions. Les méthodes exactes et heuristiques destinées à résoudre ces problèmes d'optimisation sont également présentées. La discussion porte aussi sur les futures tendances et les challenges à relever dans ce domaine.

ABSTRACT. This paper presents a survey on the recent contributions in modelling and solving of flow line balancing problems. Because of modern market changes and industrial advances, the structure and configuration of such lines change in order to meet the new demands of efficient and customized production. In this paper, we analyse and compare proposed mathematical models, in particular, we focus on mathematical modelling of different elements of a production line: manufacturing process, resources, technological constraints and objective functions. Exact and heuristic methods developed for solving flow line balancing problems are also presented. The new trends and challenges in this research area are discussed as well.

MOTS-CLÉS: Équilibrage de lignes de production, lignes d'assemblage, lignes d'usinage, modèles mathématiques, optimisation, état de l'art.

KEYWORDS: Line balancing, flow lines, assembly lines, machining lines, mathematical models, optimization, survey.

1. Introduction

La conjonction économique et environnementale actuelle pose de nouveaux défis ambitieux aux secteurs manufacturiers. Les enjeux et l'impact des décisions stratégiques, prises lors de la conception ou configuration des systèmes de production, se voient de plus en plus importants. Compte tenu de la complexité des problèmes de décision qui en relèvent, l'utilisation des méthodes d'optimisation pour leur résolution semble être une évidence. Le problème décisionnel considéré dans cet article, à savoir l'équilibrage des lignes de production, en fait partie du fait de sa complexité combinatoire et de son impact sur le coût et la performance du système de production mis en place. Le présent article a pour le but d'analyser les approches proposées dans la littérature pour la modélisation et la résolution de ce problème.

Il est facile à constater l'abondance, dans la littérature, de différentes définitions données au terme « ligne de production ». Dans cet article, nous appelons par « *ligne de production* » un système de fabrication constitué d'un ensemble de postes de travail disposés de manière séquentielle. Sur les lignes de production, un produit brut est chargé au début de la ligne (sur le premier poste de travail) et parcourt ensuite la ligne dans une seule direction. Il visite séquentiellement tous les postes de travail. Les produits finis sortent du dernier poste de travail. Lorsqu'une unité de produit arrive à un poste de travail, elle subit une suite d'opérations, effectuée par des opérateurs ou par des équipements automatiques associés à ce poste. La durée totale des opérations sur un poste de travail est appelée la *charge* du poste de travail.

Deux types de lignes peuvent être distingués par rapport à l'organisation du transfert de la pièce : lignes cadencées et non cadencées. Si une ligne est cadencée, alors toutes les pièces qui y sont traitées sont déplacées vers le poste suivant simultanément. Le fonctionnement synchronisé de la ligne se base sur la notion du temps de cycle : il est impératif que la charge de chaque poste de travail ne le dépasse pas. Si cette condition est validée, alors il est possible, au bout d'un temps de cycle, de faire avancer toutes les pièces vers leurs postes suivants. Dans les lignes non cadencées, il n'y a pas de nécessité de synchroniser les déplacements de pièces, chaque pièce avance lorsque son traitement est fini. Dans cet article, nous ne nous intéressons qu'aux lignes cadencées.

La conception des lignes de production est un problème de décision complexe. De nombreuses études dans des contextes différents ont été présentées dans la littérature, par exemple, (Chow, 1990; Dagnino, 1994; Nkasu *et al.*, 1995; He *et al.*, 1998; Dolgui *et al.*, 2006d; Rekiek *et al.*, 2006). Dans la pratique, il est impossible de confier la conception d'une ligne à une seule personne - plusieurs services se chargent de la prise de décisions.

Le processus de conception d'une ligne commence par l'analyse du produit (produits) à fabriquer et des objectifs économiques à atteindre. L'analyse de ces éléments doit permettre de choisir le type de système de production le mieux adapté. Cette décision est difficile sachant que souvent l'évaluation d'une solution par rapport à une autre ne peut être effectuée sans développement détaillé de chacune d'elles. Dans la

pratique, dans un premier temps, un ensemble des types de systèmes de production susceptibles d'être efficaces est choisi en tenant compte des données connues. Souvent, il est nécessaire de limiter la taille de cet ensemble afin de rendre envisageable l'exploration des solutions les plus prometteuses.

L'exploration d'une solution consiste à trouver, pour un type de système de production fixé, sa configuration optimale. Le nombre d'éléments à prendre en considération rend cette recherche extrêmement complexe. D'autant plus que l'examen d'une configuration possible doit être suffisamment précis afin de vérifier sa cohérence, sa faisabilité, et éviter une découverte tardive des fautes de conception à l'étape de la mise en place. La comparaison des configurations optimales trouvées pour les différents types de systèmes d'usinage permet de prendre la décision sur l'organisation de la fabrication du produit.

Le problème d'équilibrage de lignes de production, que nous étudions dans cet article, apparaît à l'étape de leur configuration. Ce problème a comme objectif de répartir les *opérations*, qui sont nécessaires pour la fabrication du produit (ou des produits), à des *postes de travail* d'une ou de plusieurs *lignes de production* tout en respectant un ensemble de *contraintes* technologiques, économiques ou autres. Pour évaluer la « qualité » de chaque solution, un certain nombre de *critères* est formulé. Ainsi un problème d'équilibrage peut être décrit par ces cinq éléments (le type et le nombre de lignes à configurer, les opérations à affecter, les postes de travail à configurer, les contraintes à respecter, les critères à optimiser).

Dans cet article, nous présentons les résultats de l'analyse des modèles mathématiques qui sont utilisés dans la littérature pour décrire ces cinq éléments. Cette analyse est développée dans les cinq sections qui suivent. La Section 2 rappelle l'historique du problème d'équilibrage de lignes de production. La Section 3 décrit les types de lignes de production qui sont généralement concernés par le problème d'équilibrage. La Section 4 classe les attributs associés aux opérations à affecter. La Section 5 présente les différentes caractéristiques des postes de travail. La Section 7 donne un aperçu des critères d'optimisation qui sont utilisés dans les problèmes d'équilibrage. Ensuite, la Section 8 porte sur l'analyse des méthodes de résolution développées pour les problèmes considérés. Enfin, la Section 9 présente une synthèse des récentes contributions et offre une discussion sur les défis à relever. Les conclusions sont données dans la Section 10.

2. Problème d'équilibrage de lignes de production : origines et positionnement dans la recherche opérationnelle

La nécessité d'organiser le processus de production de manière optimale pousse les industriels à recourir à des outils de la recherche opérationnelle et à formuler mathématiquement leurs problèmes de décision afin d'y trouver des réponses efficaces. L'apparition du problème d'équilibrage n'échappe pas à la règle : à l'origine de sa première formulation mathématique se trouve la volonté de minimiser les temps morts

des opérateurs lors du fonctionnement des chaînes d'assemblage. Cette formulation de base est connue sous le nom du SALBP (*Simple Assembly Line Balancing Problem*). Dans ce qui suit, les hypothèses utilisées dans cette première formulation sont présentées.

2.1. Formulation du problème de base : SALBP

Au regard des cinq éléments que nous utilisons pour la classification des problèmes d'équilibrage, le problème SALBP peut être décrit de façon suivante.

Les types et le nombre de lignes concernées :

- Une chaîne d'assemblage organisée en ligne droite et fabriquant un seul type de produit.

Les opérations à affecter :

- L'ensemble d'opérations $I = \{1, 2, \dots, i, \dots, |I|\}$ est connu et fixe.
- Chaque opération est caractérisée par une valeur déterministe t_i estimant sa durée.

La configuration des postes de travail :

- Les postes de travail $M = \{1, 2, \dots, k, \dots, m\}$ sont identiques en terme de configuration et toute opération peut être affectée et exécutée à tout poste de travail.

- Les opérations affectées à un poste de travail k , c'est-à-dire l'ensemble I_k , sont exécutées de manière séquentielle. La somme des durées de toutes ces opérations constitue la charge du poste de travail $T_k = \sum_{i \in I_k} t_i$.

Les contraintes à respecter :

- Chaque opération doit être effectuée entièrement sur un seul poste de travail.
- Un ordre partiel d'exécution d'opérations, imposé par le processus technologique, doit être respecté lors de l'affectation des opérations aux postes de travail. Les contraintes de ce type sont connues sous le nom de « contraintes de précédence ».
- La chaîne est synchronisée, par conséquent, la charge d'aucun poste de travail ne doit dépasser le temps de cycle objectif $T_k \leq T_0, \forall k \in M$.

Le critère à optimiser :

- L'objectif est de minimiser le nombre de postes de travail nécessaires pour affecter toutes les opérations en respectant l'ensemble de contraintes de précédence et la contrainte de temps de cycle.

Le premier modèle mathématique pour ce problème a été publié par Salveson en 1955 (Salveson, 1955). Plus tard, en 1986, cette formulation a été appelée *Simple Assembly Line Balancing Problem* (SALBP) par Baybars (Baybars, 1986). Comme cela a été démontré dans (Wee *et al.*, 1986), ce problème est NP-difficile dans le cas

général. Afin d'évaluer la difficulté d'une instance particulière de ce problème, un certain nombre d'indicateurs a été proposé dans (Bhattacharjee *et al.*, 1990; Scholl, 1999; Driscoll *et al.*, 2001).

Hormis le modèle de Salveson, trois autres formulations du problème d'équilibrage des chaînes d'assemblage se trouvent dans la classe du SALBP : chacune s'appuie sur les mêmes hypothèses (voir ci-dessus) et utilise une fonction objectif différente. Le Tableau 1 présente ces formulations.

Tableau 1. *Les variantes du SALBP*

<i>m</i> , nombre de postes de travail	T_0 , temps de cycle	
	Fixé	À minimiser
Fixé	SALBP-F	SALBP-2
À minimiser	SALBP-1	SALBP-E

- Le problème de type SALBP-F (le F désignant faisabilité) consiste à répondre à la question suivante : existe-elle une répartition de l'ensemble d'opérations I à m postes de travail satisfaisant toutes les contraintes de précédence entre les opérations et garantissant que la charge d'aucun poste ne dépasse le temps de cycle T_0 où la valeur de T_0 est fixée.

- Le problème de type SALBP-1 a comme objectif de minimiser le nombre de postes de travail nécessaire pour affecter toutes les opérations en respectant l'ensemble de contraintes de précédence et la contrainte de temps de cycle ayant T_0 fixe.

- Quant au SALBP-2, il s'agit de minimiser le temps de cycle, en affectant les opérations à une séquence de postes de travail, dont le nombre est fixé.

- Le problème SALBP-E conjugue les objectifs de SALBP-1 et SALBP-2 et vise à maximiser l'efficacité de la chaîne par la minimisation à la fois du nombre de postes de travail et du temps de cycle, soit à minimiser mT_0 .

Dans sa première publication portant sur l'équilibrage des chaînes d'assemblage, Salveson avait prédit un grand avenir pour cette problématique. En effet, un nombre important de modèles mathématiques et méthodes de résolution pour ce problème ont été développés au fil des années. Plusieurs études bibliographiques ont été consacrées à l'analyse de ces méthodes, dont les plus connues sont : (Ignall, 1965; Masstor, 1970; Buxey *et al.*, 1973; Baybars, 1986; Ghosh *et al.*, 1989; Erel *et al.*, 1998; Talbot *et al.*, 1986; Ponnambalam *et al.*, 1999; Scholl, 1999; Rekiek *et al.*, 2002a; Scholl *et al.*, 2006). Parmi ces publications, il y a quelques unes entièrement consacrées au SALBP : l'état de l'art des méthodes exactes (Baybars, 1986), des comparaisons des performances des méthodes approchées (Talbot *et al.*, 1986; Boctor, 1995; Ponnambalam *et al.*, 1999), sans oublier la plus récente publication (Scholl *et al.*, 2006), qui donne un large aperçu sur les méthodes de résolution dédiées au SALBP, mais aussi sur les algorithmes de calcul des bornes inférieures, les méthodes de pré-traitement et les règles de dominance.

Il est à noter que de nombreuses récentes publications (Kilincçi *et al.*, 2006; Nearchou, 2007; Blum, 2008; Kilincçi *et al.*, 2008; Liu *et al.*, 2008; Kilincçi, 2009; Özcan *et al.*, 2009a; Bautista *et al.*, 2009; Pastor *et al.*, 2009) montrent que la résolution de ce problème reste toujours d'actualité. Cependant, selon (Bautista *et al.*, 2009), leur algorithme heuristique basé sur la programmation dynamique avec l'agrégation des états (appelé Bounded Dynamic Programming) fournit 267 solutions optimales sur 269 instances de référence recensés dans la littérature.

2.2. Généralisation du problème de base : GALBP

La formulation du SALBP n'exprime pas toute la réalité industrielle à cause des hypothèses simplificatrices sur lesquelles elle se base (Ghosh *et al.*, 1989). Par conséquent, plusieurs chercheurs ont essayé d'introduire des hypothèses plus générales. N'importe quel problème de type ALBP ayant au moins une hypothèse étendue par rapport à la formulation de base (SALBP) a été nommé dans la littérature *Generalized Assembly Line Balancing Problem* (GALBP).

Les articles présentant l'état de l'art sur GALBP (Ghosh *et al.*, 1989; Rekiek *et al.*, 2002a; Becker *et al.*, 2006) permettent d'observer l'évolution des hypothèses et des approches de résolution proposées. Dans (Ghosh *et al.*, 1989), les auteurs ont comparé 64 travaux concernant les problèmes de type SALBP et de GALBP (publiés pendant la période 1955-1985). Environ vingt ans plus tard, 146 travaux traitant seulement les problèmes de type GALBP (publiés pendant la période 1965-2006) ont été recensés dans (Becker *et al.*, 2006).

Notons que certaines formulations sont « plus générales » que d'autres, cela rend la définition « non SALBP = GALBP » inappropriée. Il est indispensable d'introduire une classification explicite des formulations des problèmes généralisés d'équilibrage. D'ailleurs, une première version d'une telle classification a été proposée dans (Boysen *et al.*, 2008). Toutefois, la classification suggérée ne permet pas de voir clairement pour quels types de problème on dispose des méthodes efficaces. Bien que les situations industrielles réelles soient différentes, il est parfois possible de les décrire en recourant aux mêmes modèles mathématiques et, par conséquent, de résoudre les problèmes d'optimisation correspondants par le biais des mêmes méthodes de résolution. Dans le présent article, une autre classification est proposée. Elle est basée sur l'analyse des cinq éléments de base caractérisant un problème d'équilibrage, à savoir le type et le nombre de lignes à équilibrer, la modélisation des opérations, des postes de travail et des contraintes ainsi que le(les) critère(s) à optimiser.

3. Type et nombre de lignes à équilibrer

Initialement, le problème d'équilibrage a été posé pour la conception d'une seule ligne de production. Cependant face à un marché avec une demande variable et difficilement prévisible, les industriels cherchent à avoir la possibilité de monter la ca-

dence de production de façon progressive. Une des solutions possibles est d'utiliser plusieurs lignes parallèles au lieu d'une seule ligne à cadence élevée. Ainsi la fabrication peut démarrer à faible cadence qui pourra être augmentée par la suite. De façon générale, de telles lignes parallèles ne sont pas forcément identiques. Le problème de conception de plusieurs lignes apparaît aussi lorsque certaines lignes fournissent des composants pour les autres. Dans ce cas, la nécessité d'accorder la capacité des lignes adjacentes mène à la mise en place des lignes parallèles. Les travaux considérant la conception de plusieurs lignes ne sont pas nombreux, nous pouvons en citer les suivants (Miltenburg, 1998; Gökçen *et al.*, 2006b; Chiang *et al.*, 2007; Scholl *et al.*, 2009a; Özcan *et al.*, 2010).

En ce qui concerne les différents types de ligne, les distinctions entre les modèles mathématiques apparaissent, le plus souvent, au niveau des contraintes. Ainsi il est possible d'utiliser les méthodes développées pour les problèmes ayant plus de contraintes pour la résolution des problèmes où il y a moins de contraintes, même si les types de ligne sont différents. Hormis les lignes séquentielles où les postes de travail forment une ligne droite, nous pouvons citer les lignes suivantes :

- avec les postes de travail installés en U (u-lines), voir par exemple (Chiang *et al.*, 2006; Ağpak *et al.*, 2007; Kara *et al.*, 2007; Hwang *et al.*, 2008; Toklu *et al.*, 2008; Toksarı *et al.*, 2008; Hwang *et al.*, 2009; Sabuncuoglu *et al.*, 2009) ;
- les lignes où les équipements sont installés des deux cotés du convoyeur (two-sided lines). Les récentes versions de ce problème considèrent à la fois l'équilibrage de ces lignes et l'ordonnancement des opérations affectées au même poste de travail, voir par exemple (Baykasoğlu *et al.*, 2008; Wu *et al.*, 2008; Özcan *et al.*, 2009b) ;
- les lignes mixtes fabriquant différents types de produit (mixed-lines), elles ont fait l'objet de nombreuses publications, dont les plus récentes sont : (Noorul Haq *et al.*, 2006; Kara *et al.*, 2007; Hwang *et al.*, 2009).

4. Modélisation des opérations

Chaque opération est caractérisée par au moins un paramètre qui représente sa durée, mais d'autres paramètres peuvent lui être associés comme, par exemple, son coût. Le paramètre incontournable est le temps opératoire, considéré par presque tous les auteurs. Ceci découle du fait que la contrainte sur le temps de cycle est une des caractéristiques principales des lignes de production cadencées. Les modèles mathématiques où les opérations ont plusieurs paramètres sont peu nombreux, encore moins nombreux sont ceux avec des paramètres représentés de façons différentes. Il est à noter que certaines approches de résolution permettent d'intégrer facilement des paramètres complémentaires dans la formulation du problème traité ou de changer la modélisation d'un paramètre, par exemple, toutes les approches basées sur la recherche du plus court chemin dans un graphe des solutions. Pourtant peu d'auteurs ont étudié des adaptations éventuelles des algorithmes développés suite à de telles modifications.

Nous pouvons tout de même citer quelques travaux dans cette direction : (Sphicas *et al.*, 1976; Johnson, 1983; Kim *et al.*, 2000c; Boysen *et al.*, 2007).

Dans ce qui suit, nous présentons les paramètres des opérations utilisés dans la littérature, parmi lesquels nous distinguons les paramètres-constantes, les paramètres-variables aléatoires, les paramètres-variables flous et les paramètres dont les valeurs dépendent de différents éléments de la ligne.

4.1. Paramètres-constantes

Le paramètre j peut être représenté par une constante, si sa valeur est connue et invariable pour chaque opération i soit $p_j(i) = \text{const.}$ Par exemple, l'hypothèse que les temps opératoires sont constants est une hypothèse de base du SALBP. Les valeurs d'un paramètre qui est constant peuvent appartenir :

1) à l'ensemble des nombres réels $p_j(i) \in \mathbb{R}$, par exemple :

- le temps (Salveson, 1955),
- le coût d'exécution (Amen, 2000a; Bukchin *et al.*, 2006),
- le coût d'incomplétion (Sarin *et al.*, 1999; Gamberini *et al.*, 2006; Gamberini *et al.*, 2009),
- l'espace nécessaire (Lee *et al.*, 1991; Kim *et al.*, 1995; Sawik, 2002),
- l'effort physique nécessaire pour l'exécution de l'opération et le risque qu'il implique (Choi, 2009), etc.

2) à l'ensemble des nombres entiers $p_j(i) \in \mathbb{N}$, par exemple, le temps (Sarker *et al.*, 1983; Wilhelm, 1999), etc.

3) ou à un ensemble fini $p_j(i) \in \mathcal{A}$, par exemple,

- le côté de la pièce ou de la ligne sur lequel l'opération doit être exécutée (Buxey, 1974; Lapierre *et al.*, 2004; Hu *et al.*, 2008; Kim *et al.*, 2009),
- la direction de l'opération, le type d'équipement ou d'outil à utiliser pour l'exécution de l'opération (Tseng *et al.*, 2008; Ege *et al.*, 2009), etc.

4.2. Paramètres-variables aléatoires

La valeur du paramètre j est une variable aléatoire, dont la moyenne et la variance (μ, σ^2) sont connus pour chaque opération i soit $p_j(i) = f(\mu, \sigma^2)$. Les formulations avec des temps opératoires stochastiques ont été étudiées, par exemple, dans (Moodie *et al.*, 1965; Kao, 1976; Kao, 1979; Sniedovich, 1981; Raouf *et al.*, 1982; Carraway, 1989; Suresh *et al.*, 1994; Sarin *et al.*, 1999; Gamberini *et al.*, 2006; Baykasoğlu *et al.*, 2007; Urban *et al.*, 2006; Chiang *et al.*, 2006; Ağpak *et al.*, 2007; Gamberini *et al.*, 2009).

4.3. Paramètres-variables floues

La valeur du paramètre j est une variable floue, soit $p_j(i) = \bar{p}$ (Tsujimura *et al.*, 1995; Hop, 2006).

4.4. Paramètres dépendant du temps de fonctionnement de la ligne

La valeur du paramètre j change en fonction du temps t de fonctionnement de la ligne soit $p_j(i) = f(t)$. De tels paramètres sont donnés par leurs valeurs initiales et les fonctions décrivant leur évolution dans le temps. Par exemple, ces temps peuvent être diminués grâce à l'apprentissage des opérateurs (Boucher, 1987; Chakravarty, 1988; Cohen *et al.*, 1998; Toksari *et al.*, 2008; Toksari *et al.*, 2009) ou augmentés à cause de l'effet de fatigue (Digiesi *et al.*, 2009). Plusieurs fonctions ont été proposées pour modéliser l'effet d'apprentissage (Womer, 1979; Yelle, 1979; Biskup, 1999).

4.5. Paramètres dépendant de l'affectation des opérations

La valeur du paramètre j , associée à l'opération i , dépend de l'ensemble des opérations qui ont déjà été exécutées ou sont affectées au même poste de travail, soit $p_j(i) = f(I_k)$. Par exemple :

- le temps d'exécution d'une opération peut dépendre des opérations effectuées auparavant (Chen *et al.*, 2002; Capacho *et al.*, 2006; Capacho *et al.*, 2009; Scholl *et al.*, 2008; Kulak *et al.*, 2008);
- le temps opératoire nécessaire pour exécuter l'opération i (et/ou le coût d'exécution de l'opération i) peut dépendre de l'opération h qui la suit, dans ce cas, $p_j(i) = f(h)$ (Graves *et al.*, 1983; Wilhelm, 1999).

4.6. Paramètres dépendant de la configuration du poste de travail

La valeur du paramètre j varie en fonction des paramètres du poste où l'opération est affectée, soit $p_j(i) = f(A_k)$. Par exemple :

- le temps opératoire peut dépendre du type d'équipement installé sur le poste de travail correspondant (Graves *et al.*, 1988; Faaland *et al.*, 1992; Bukchin *et al.*, 2000; Gadidov *et al.*, 2000; Levitin *et al.*, 2006; Chiang *et al.*, 2007; Pekin *et al.*, 2008; Gao *et al.*, 2009) ou du niveau de l'opérateur (Wong *et al.*, 2006),
- le coût d'une opération peut dépendre du poste de travail où elle est exécutée (Wei *et al.*, 1997) ou du type d'équipement installé sur ce poste de travail (Graves *et al.*, 1988).
- Une autre hypothèse, considérée par (Shtub, 1984; Wilson, 1986), admet que les temps opératoires sont des fonctions linéaires non croissantes de la taille de l'équipe assignée au poste de travail où l'opération est affectée.

5. Modélisation des postes de travail

5.1. Structure d'un poste de travail

Un poste de travail est une ressource de la ligne à laquelle l'on affecte des opérations. Mais il peut être nécessaire de lui associer d'autres éléments, comme, par exemple, des opérateurs ou des équipements. Dans le cadre de la classification que nous proposons, nous caractérisons ces éléments à l'aide des *attributs* des postes de travail. Nous désignons par $A(k)$ l'ensemble des attributs qui déterminent la configuration du poste de travail k . Ces attributs permettent de différencier les postes de travail, car souvent ils ne sont pas identiques. Nous distinguons les *attributs scalaires* $A^s(k)$ et les *attributs vectoriels* $A^v(k)$.

Les attributs scalaires caractérisent un poste de travail comme un objet entier. Par exemple, le nombre d'équipements à installer en parallèle sur un poste de travail est un attribut scalaire si toutes les unités d'équipement effectuent le même ensemble d'opérations (qui a été affecté au poste de travail). En revanche, un attribut vectoriel est utilisé lorsqu'une répartition des opérations entre plusieurs éléments d'un poste est nécessaire. Par exemple, la répartition des opérations entre les boîtiers multibroches installés sur un poste de travail d'une ligne d'usinage de grande série (Guschinskaya *et al.*, 2008; Guschinskaya *et al.*, 2009) peut être représentée par un attribut vectoriel a_j^v . Dans ce cas, chaque élément h de l'attribut vectoriel a_j^v du poste de travail k est caractérisé par son propre ensemble d'opérations $I(a_{jh}^v(k))$ qui est un sous-ensemble de l'ensemble I_k .

La nécessité de déterminer les attributs des postes de travail à l'étape de la structuration de la ligne amène à résoudre simultanément les deux problèmes d'optimisation suivants : le problème d'équilibrage et de structuration de la ligne. Il est à noter que l'existence des attributs vectoriels augmente la complexité du problème à résoudre, car il convient de répartir des opérations « à l'intérieur » de chaque poste de travail.

Selon les attributs de postes de travail qui sont pris en compte, les problèmes d'équilibrage se déclinent en trois catégories :

- 1) $A(k) = \emptyset$

Tous les postes de travail sont identiques, par conséquent, il n'y a que le problème d'affectation des opérations aux postes.

- 2) $A^s(k) \neq \emptyset$

Hormis l'affectation d'opérations aux postes de travail, il convient de choisir la configuration de chaque poste en déterminant les valeurs des attributs scalaires de ce poste, par exemple :

- décider si la duplication du poste travail en question est nécessaire ou non (Pinto *et al.*, 1981; Essafi *et al.*, 2009; Essafi *et al.*, 2010),
- choisir un type d'équipement à installer sur ce poste de travail (Bukchin *et al.*, 2000; Gadidov *et al.*, 2000) ou affecter un opérateur d'un groupe donné (Miralles

et al., 2008),

- déterminer le nombre de machines identiques à mettre en parallèle (Bukchin *et al.*, 2002b) ou définir la taille de l'équipe d'opérateurs qui travaillera sur ce poste (Shtub, 1984; Wilson, 1986; Johnson, 1991).

3) $A^v(k) \neq \emptyset$

La configuration de chaque poste de travail comporte un ensemble d'éléments dont chacun possède un sous-ensemble des opérations qui lui sont associées. La répartition des opérations à ces éléments est représentée par un attribut vectoriel et nécessite d'être déterminée.

Exemples :

- concevoir des lignes où il est possible de mettre des équipements des deux côtés du convoyeur (Bartholdi, 1993; Lee *et al.*, 2001; Hu *et al.*, 2008; Kim *et al.*, 2009; Özcan *et al.*, 2009b; Simaria *et al.*, 2009a),
- affecter plusieurs équipements ou opérateurs aux mêmes postes de travail en répartissant la charge entre eux (Belmokhtar *et al.*, 2006; Belmokhtar *et al.*, 2007; Dimitriadis, 2006; Moon *et al.*, 2008).

Théoriquement, chaque élément d'un attribut vectoriel peut à son tour être composé d'un ensemble de sous-éléments et ainsi de suite, mais vu la complexité grandissante d'une telle modélisation, pour l'instant, ces modèles n'ont pas été formulés dans la littérature.

5.2. Attributs scalaires

Les attributs scalaires sont utilisés généralement pour décrire différentes configurations possibles de postes de travail. Le choix d'une valeur pour l'attribut scalaire j peut être effectué en fonction des opérations affectées au poste k , c'est-à-dire $a_j^s(k) = f(I(k))$, ou en tenant compte d'autres attributs de ce poste de travail $a_j^s(k) = f(A(k))$ ou encore des attributs d'autres postes de travail, alors $a_j^s(k) = f(A(M))$. Il est également possible de combiner ces trois fonctions.

1) Par rapport aux opérations affectées à un poste, les valeurs des attributs scalaires de celui-ci peuvent être :

- déterminées par les paramètres des opérations (souvent de type $p_h(i) \in \mathcal{A}$) qui sont affectées au poste. Dans ce cas, l'affectation de la première opération détermine la valeur de l'attribut du poste et donc de toutes les autres opérations qui seront affectées à ce poste. Les valeurs de l'attribut $a_j^s(k)$ appartiennent au même ensemble fini \mathcal{A} que les valeurs du paramètre $p_h(i)$. Par exemple, s'il existe des opérations qui se font à différente hauteur, certaines en haut, d'autres en bas. Alors, une fois une opération affectée au poste de travail, la hauteur de ce poste doit correspondre à la hauteur de cette opération. En conséquence, toute opération nécessitant une hauteur différente ne pourra plus être affectée à ce poste afin de minimiser l'effort physique de l'opéra-

teur qui, au cas contraire, serait obligé de descendre et de monter alternativement lors de l'exécution des opérations.

- calculées à partir des paramètres des opérations affectées au poste de travail. Prenons l'exemple des équipements installés en parallèle sur un poste de travail. Cette solution permet notamment d'exécuter des opérations dont le temps opératoire dépasse le temps de cycle. Il existe dans la littérature plusieurs règles pour le choix du nombre d'équipements à dupliquer. Nous ne présentons ici que la plus simple. Soit w_k le nombre d'équipements parallèles du poste de travail, alors la valeur de w_k peut être calculée comme suit :

$$w_k = \left\lceil \frac{T_k}{T_0} \right\rceil$$

Alors le nombre d'équipements parallèles dépend du temps opératoire total des opérations affectées au poste de travail.

- les valeurs des attributs scalaires peuvent aussi avoir de l'impact sur les valeurs des paramètres des opérations de type $p(i) = f(A^s(k))$. Par exemple, dans (Shtub, 1984; Wilson, 1986) les temps opératoires sont des fonctions linéaires non croissantes de la taille de l'équipe assignée au poste de travail où l'opération est affectée.

2) Par rapport aux autres attributs du même poste, ils peuvent être :

- indépendants, s'il n'existe pas de lien entre les attributs ;
- dépendants, s'il faut tenir compte d'impossibles combinaisons des attributs au même poste de travail, par exemple, s'il existe des contraintes d'incompatibilité entre les équipements disponibles (Rekiek *et al.*, 2002b; Dolgui *et al.*, 2006c; Belmokhtar *et al.*, 2006).

3) Par rapport aux autres postes de la chaîne, les attributs peuvent être :

- indépendants : par exemple, s'il est considéré qu'il y a un ensemble connu de types d'équipements et le nombre d'équipements disponibles de chaque type est infini (Graves *et al.*, 1988; Bukchin *et al.*, 2000; Gadidov *et al.*, 2000; Bukchin *et al.*, 2002b) ;

- dépendants, si la configuration d'un poste de travail dépend des configurations d'autres postes de la même ligne. Par exemple, s'il y a un ensemble d'équipements ou d'opérateurs de taille finie, alors si un équipement ou un opérateur est affecté à un poste de travail, il sera impossible de l'affecter à un autre poste de travail (Ağpak *et al.*, 2005; Belmokhtar *et al.*, 2006; Miralles *et al.*, 2008). La même hypothèse est valable pour l'affectation des opérateurs ayant différents niveaux de compétences, si leur nombre est fixe (Chan *et al.*, 1998). Un autre facteur faisant que la configuration d'un poste dépend des postes voisins est l'existence de zones de travail : tous les postes appartenant à la même zone de travail ont forcément des attributs communs, comme, par exemple, la hauteur du convoyeur dans (Lapierre *et al.*, 2004).

5.3. *Attributs vectoriels*

Les attributs vectoriels sont utilisés pour décrire les relations entre les ressources et les opérations d'un poste de travail. Comme nous l'avons déjà évoqué, l'introduction d'attributs vectoriels augmente la complexité du problème à résoudre. Pour cette raison, probablement, les formulations les utilisant ne sont pas nombreuses.

Un attribut vectoriel représente une configuration d'un poste de travail comportant un ensemble de ressources dont chacune possède un sous-ensemble des opérations qui lui sont associées. Il est généralement nécessaire : premièrement, de déterminer l'ensemble de ressources associées au poste de travail (dont la cardinalité nous désignons par $\dim a_j^v$); deuxièmement, de répartir les opérations affectées au poste de travail entre ces ressources. Les ressources sont représentées par les éléments correspondants de l'attribut vectoriel. Cette répartition peut être :

- **immédiate**, si parmi les éléments de l'attribut vectoriel, il n'y a en qu'un seul qui convient à l'affectation de chaque opération. Par exemple, dans (Kim *et al.*, 1995), les auteurs considèrent le cas de la conception des lignes robotiques, où plusieurs types d'outils peuvent être installés sur chaque poste de travail, chaque opération pouvant être exécutée par un seul type d'outil. Dans (Chiang *et al.*, 2007; Gao *et al.*, 2009; Ege *et al.*, 2009), plusieurs types d'équipements peuvent être installés sur un poste de travail, mais il n'a pas d'ambiguïté pour la répartition des opérations entre les équipements du poste de travail.

- **à optimiser**, s'il existe plusieurs possibilités d'affectation de chaque opération à l'intérieur de chaque poste de travail et le choix de son affectation n'est pas évident. Prenons l'exemple des lignes où il est possible de mettre des opérateurs ou des équipements des deux côtés du convoyeur (Bartholdi, 1993; Lee *et al.*, 2001; Özcan *et al.*, 2009c; Kim *et al.*, 2009). Dans ce cas, l'affectation des opérations qui peuvent être exécutées de côté gauche comme de côté droit n'est pas certaine et doit être optimisée. De plus, il peut y avoir plusieurs postes en parallèle comme dans (Kahan *et al.*, 2009; Scholl *et al.*, 2009a) et dans ce cas, les opérations doivent également être réparties entre ces postes.

Enfin, il peut être nécessaire de tenir compte d'impossibles combinaisons d'affectation, par exemple, s'il existe des contraintes d'incompatibilité entre les équipements disponibles (Rekiek *et al.*, 2002b; Dolgui *et al.*, 2006c; Belmokhtar *et al.*, 2006; Kulak *et al.*, 2008)

5.4. *Caractéristiques calculées*

Les attributs de postes de travail décrivent leur configuration. Déterminer les valeurs de ces attributs fait, généralement, partie de la solution. Pour les solutions possibles, les différentes caractéristiques de postes de travail sont calculées, notamment en vue de vérifier certaines contraintes ou de calculer la valeur de la fonction objectif utilisée. Nous désignons l'ensemble des caractéristiques d'un poste de travail k par

$C(k)$. Il est à noter que les valeurs de certaines caractéristiques doivent être calculées en tenant compte de l'affectation des opérations aux éléments constituant les attributs vectoriels.

Les fonctions de calcul des caractéristiques de postes de travail peuvent être très diverses, les plus simples ont les formes suivantes :

- $c_j(k) = \sum_{i \in I_k} p_j(i)$

Exemples : la charge du poste de travail k dans (Salveson, 1955) ; l'espace nécessaire pour l'exécution des opérations du poste de travail k dans (Sawik, 2002).

- $c_j(k) = \max\{p_j(i), i \in I_k\}$

Exemples : le coût d'exécution d'opérations sur le poste de travail k dans (Amen, 2000a; Amen, 2000b; Amen, 2001; Amen, 2006) ; le temps d'exécution de l'ensemble d'opérations affecté à un boîtier multibroche dans (Finel, 2004).

- $c_j(k) = a_j^s(k) \cdot b$, où b est une constante

Exemples : le coût salarial des opérateurs affectés au poste k , dans ce cas $a_j^s(k)$ est le nombre d'opérateurs travaillant sur le poste de travail k et b représente le montant du salaire d'un opérateur (Sarker *et al.*, 1983; Bard, 1989; McMullen *et al.*, 1998) ; le coût des boîtiers multibroches installés sur un poste de travail (Finel *et al.*, 2008; Dolgui *et al.*, 2006a; Guschinskaya *et al.*, 2008).

- $c_j(k) = \sum_{h=1}^{\dim a_j^v} a_{jh}^v(k) \cdot b_h$,

où b_h est une constante associée à l'élément $a_{jh}^v(k)$.

Exemples : le coût des équipements installés sur un poste de travail, dans ce cas $a_{jh}^v(k)$ donne le type d'équipement et b_h le coût correspondant (Rekiek, 2001; Belmokhtar *et al.*, 2006) ; le coût salarial des opérateurs affectés au poste de travail (Moon *et al.*, 2008), si les opérateurs ont des salaires différents.

Nous rapportons également quelques caractéristiques calculées dans le cadre de l'installation de ressources identiques et parallèles sur un poste de travail lorsque la charge d'un poste de travail T_k dépasse le temps de cycle T_0 .

Puisque l'attribut w_k , déjà introduit, ne peut être qu'un nombre entier, la caractéristique suivante est calculée :

$$u_k = \frac{T_k}{T_0 \cdot w_k}$$

u_k mesure le taux d'utilisation des équipements ou des opérateurs installés en parallèle sur le poste k .

Une autre caractéristique qui est souvent calculée si les temps opératoires sont représentés par des variables aléatoires est pr_k , la probabilité que la charge du poste de travail k ne dépassera pas le temps de cycle T_0 . Si la somme des temps opératoires suit la loi de Gauss avec la moyenne T_k et l'écart type $\sqrt{\sum_{i \in I(k)} \sigma_i^2}$, où σ_i est l'écart type de la durée de l'opération i , alors pr_k , est calculée comme suit (?) :

$$pr_k = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_{-\infty}^Y e^{-\frac{z^2}{2}} dz, \text{ où } Y = \frac{T_0 \cdot w_k - T_k}{\sqrt{\sum_{i \in I(k)} \sigma_i^2}}$$

Il est à noter que la caractéristique la plus calculée est, sans doute, la charge des postes de travail, qui est utilisée pour vérifier la contrainte de temps de cycle. Nous rappelons que la charge d'un poste de travail est définie comme le temps durant lequel une unité de pièce séjourne sur ce poste de travail. Il existe différents modèles pour la calculer (correspondant à différentes lignes de production), dans ce qui suit, nous en présentons quelques uns les plus utilisés.

5.5. Calcul de la charge des postes de travail

Dès qu'un ensemble d'opérations est affectés à un poste de travail, il est possible d'estimer le temps nécessaire pour exécuter cet ensemble. À ce niveau, il existe trois principales hypothèses :

1) Les opérations s'exécutent séquentiellement

– ... et l'ordre d'exécution d'opérations n'a aucune importance pour le calcul de la charge des postes de travail (l'hypothèse de la formulation de base). Dans ce cas, $T_k = \sum_{i \in I_k} t_i$. Ce modèle est utilisé lorsque tous les temps auxiliaires sont soit négligeables, soit déjà inclus dans les temps opératoires. Parfois, un incrément de temps est également associé à chaque poste de travail (Boysen *et al.*, 2008). Il peut représenter, par exemple, le temps de chargement/déchargement de la pièce.

– ... et le temps d'exécution des opérations dépend de la séquence dans laquelle elles se font, et ce pour plusieurs raisons :

- les temps de déplacement d'outil, de changement d'outil et/ou de rotation de la pièce ne sont pas négligeables (Arcus, 1966; Graves *et al.*, 1988; Wilhelm, 1999; Bautista *et al.*, 2002; Essafi *et al.*, 2010; Essafi *et al.*, 2009). Dans ce cas, $T_k = \sum_{i \in I_k} (t_i + \Delta t_{ij})$, où $j \in I(k)$ est une opération qui est exécutée juste après l'exécution de l'opération i sur le même poste de travail.

- l'ordre d'exécution des opérations a un impact sur leurs durées. Par exemple, l'exécution de l'opération i avant l'opération j peut rendre l'exécution de l'opé-

ration j plus longue, car l'endroit de l'exécution devient plus difficilement accessible (Capacho *et al.*, 2006; Capacho *et al.*, 2009; Scholl *et al.*, 2008). Dans ce cas $T_k = \sum f_i(I_k)$.

- dans le cas des lignes où il est possible de mettre des opérateurs et/ou des équipements des deux côtés du convoyeur, il peut avoir des délais entre l'exécution de deux opérations qui sont affectées à deux côtés différents. Si l'une précède directement l'autre, mais le début de la deuxième opération a été prévu avant la fin de la première, dans ce cas, il faudra attendre la fin de la première opération pour pouvoir commencer la deuxième et un temps mort apparaît (Kim *et al.*, 2000c; Lee *et al.*, 2001; Wu *et al.*, 2008; Simaria *et al.*, 2009a; Kim *et al.*, 2009; Özcan *et al.*, 2009c; Özcan *et al.*, 2009d).

2) Les opérations s'exécutent en parallèle, voir par exemple (Belmokhtar *et al.*, 2006; Dolgui *et al.*, 2006c; Dolgui *et al.*, 2008a).

3) Le mode mixte est utilisé pour exécuter les opérations affectées à un poste de travail, voir par exemple (Belmokhtar *et al.*, 2007; Guschinskaya *et al.*, 2007; Dolgui *et al.*, 2009a).

6. Contraintes

Les contraintes sont utilisées pour délimiter l'ensemble des solutions admissibles. Les origines des contraintes peuvent être de nature technologique, économique ou logique. Les contraintes suivantes ont été introduites dans la littérature pour les problèmes d'équilibrage des lignes de production.

6.1. Contraintes d'affectation

- Toutes les opérations de l'ensemble I doivent être affectées pour être exécutées : soit pendant un temps de cycle (le cas des lignes fabriquant un seul type de produit), soit pendant plusieurs temps de cycle (le cas des lignes fabriquant des produits de différents types) (Vilarinho *et al.*, 2002; Simaria *et al.*, 2004; Hop, 2006; Venkatesh, 2008; Zhang *et al.*, 2009).

- Les **contraintes de précedence** entre les opérations doivent être respectées (ce sont les contraintes les plus utilisées) (Salveson, 1955; Baybars, 1986). Ces contraintes prennent une forme particulière pour les lignes en U (Chiang *et al.*, 2006; Ağpak *et al.*, 2007; Kara *et al.*, 2007; Hwang *et al.*, 2008; Toklu *et al.*, 2008; Toksarı *et al.*, 2008; Hwang *et al.*, 2009; Sabuncuoglu *et al.*, 2009).

- Les **contraintes d'inclusion** sont introduites pour imposer que certains sous-ensembles d'opérations soient réalisés sur le même poste de travail (Deckro, 1989). Il est à noter que dans le cas de la conception d'une ligne fabriquant un seul produit et ayant des postes identiques, les opérations liées par ce type de contraintes peuvent être fusionnées en créant des macro-opérations (Buxey, 1974; Deckro, 1989), puisque

l'affectation d'une opération définit explicitement l'affectation des autres. Cette fusion des opérations est impossible si les postes de travail ont des attributs vectoriels, car il ne suffit pas d'affecter les opérations aux postes, mais également les répartir entre différents éléments associés à chaque poste (Guschinskaya *et al.*, 2008; Baykasoğlu *et al.*, 2008; Guschinskaya *et al.*, 2009; Özcan *et al.*, 2009c; Özcan *et al.*, 2009c; Simaria *et al.*, 2009a)

- Les **contraintes d'exclusion** sont utilisées pour interdire l'exécution de certains sous-ensembles d'opérations sur le même poste de travail (Buxey, 1974; Raouf *et al.*, 1982; Baykasoğlu *et al.*, 2008; Özcan *et al.*, 2009c; Özcan *et al.*, 2009b; Özcan *et al.*, 2009c; Özcan *et al.*, 2009b; Simaria *et al.*, 2009a) ou par le même type d'équipement (Dolgui *et al.*, 2006c; Dolgui *et al.*, 2008b; Guschinskaya *et al.*, 2008; Guschinskaya *et al.*, 2009). Ce type de contraintes permet d'éviter l'affectation au même poste soit des opérations nécessitant des équipements aux conditions d'exploitation incompatibles, soit tellement différentes qu'une telle affectation conduit à un coût trop important.

- Les **contraintes de synchronisation** sont utilisées pour les lignes où il est possible de mettre des équipements des deux côtés du convoyeur pour imposer l'exécution des certaines opérations en même temps, mais par des équipements différents (Simaria *et al.*, 2009a; Özcan *et al.*, 2009c; Özcan *et al.*, 2009b)

- Les **contraintes sur les zones de travail** imposant des distances entre les opérations (minimum ou maximum). Ces distances sont exprimées soit en nombre de postes de travail, soit en temps entre la fin d'une opération et le début de l'autre (Park *et al.*, 1996; Pastor *et al.*, 2000).

6.2. Contraintes sur les attributs de postes

- Les contraintes entre les attributs scalaires d'un poste de travail et les paramètres des opérations qui lui sont affectées (nous notons ce type de contraintes comme $a_j^s(k) \sim p_j(i)$). L'introduction de ce type de contraintes peut être une autre façon d'exprimer l'incompatibilité entre les opérations. Dans ce cas, l'opération i peut être affectée au poste de travail k si et seulement si elle a la même valeur du paramètre $p_j(i)$ que l'attribut scalaire $a_j^s(k)$ associé au poste k (Johnson, 1983);

- Les contraintes entre les différents attributs d'un poste de travail (Rekiek *et al.*, 2002b; Dolgui *et al.*, 2006c; Belmokhtar *et al.*, 2006);

- Les contraintes entre les attributs de différents postes de travail, par exemple, $\sum_{k=1}^m a_j^s(k) \leq b$ ou $\sum_{k=1}^m \dim a_j^v(k) \leq b$ si le nombre total d'opérateurs ou d'équipements à affecter est limité (Ağpak *et al.*, 2005; Belmokhtar *et al.*, 2006; Miralles *et al.*, 2008).

6.3. Contraintes sur les caractéristiques de postes

Ces contraintes peuvent être exprimées des façons suivantes :

- $c_j(k) \leq b$

Exemples : la charge du poste de travail k ne doit pas dépasser le temps de cycle $b = T_0$; l'espace nécessaire pour exécuter les opérations affectées au poste k doit être inférieur à l'espace disponible b , etc. ;

- $Pr[c_j(k) \leq b] \geq \alpha$

Exemples : la probabilité que la somme des temps opératoires ne dépasse pas le temps de cycle fixe $b = T_0$ doit être supérieur ou égal à α (Kao, 1976; Kao, 1979; Sniedovich, 1981; Carraway, 1989; ?; Baykasoğlu *et al.*, 2007) ;

- $c_j(k) \leq a_h^s(k)$ par exemple : s'il faut admettre un certain déséquilibre entre la charge de différents postes de travail, alors la valeur $a_h^s(k)$ représente le seuil du temps alloué au poste de travail k (Johnson, 1983; Erel *et al.*, 1999).

7. Fonction objectif

Comme cela a été déjà dit, la fonction objectif est utilisée afin de distinguer la(les) meilleure(s) solution(s) parmi les solutions admissibles d'un problème d'équilibrage des lignes de production.

7.1. Fonctions objectif de base

Nous avons déjà introduit trois fonctions objectif suivantes :

- m , le nombre de postes de travail à installer doit être minimisé (le plus souvent utilisée, voir par exemple (Scholl, 1999)) ;

- T_0 , le temps de cycle de la ligne est à minimiser (Rubinovitz *et al.*, 1995; Park *et al.*, 1996; Sawik, 2002; Liu *et al.*, 2003; Simaria *et al.*, 2004; Levitin *et al.*, 2006; Nearchou, 2007; Kulak *et al.*, 2008; Miralles *et al.*, 2008; Gao *et al.*, 2009; Kim *et al.*, 2009) ;

- mT_0 , le temps de séjour de la pièce dans la ligne doit être minimisé (Macaskill, 1972; Chakravarty, 1988; Scholl *et al.*, 1999b).

Certains auteurs ont étudié l'impact de l'utilisation de ces trois fonctions objectif sur la qualité des solutions, voir, par exemple, (Nkasu *et al.*, 1995; Bukchin, 1998).

7.2. Fonctions objectif utilisant les caractéristiques de postes de travail

- Le critère qui est souvent utilisé afin d'évaluer la qualité « d'équilibrage » de la ligne concerne la régularité des charges des postes de travail, c'est-à-dire « smooth-

ness » (le terme anglo-saxon). Un certain nombre de caractéristiques peuvent être utilisées afin d'évaluer la qualité « d'équilibrage », par exemple, l'écart moyen absolu SSL_{abs} ou l'écart type SSL_{ecrt} . Ces caractéristiques sont à minimiser. Si $\tilde{T} = \frac{1}{m} \sum_{i \in I} t_i$ est la charge « optimale » des postes de travail de la ligne (parfois $\tilde{T} = T_0$), alors ces caractéristiques peuvent être calculées comme suit :

$$SSL_{abs} = \frac{1}{m} \sum_{k=1}^m |T_k - \tilde{T}|, \quad SSL_{ecrt} = \sqrt{\sum_{k=1}^m (T_k - \tilde{T})^2}$$

la dernière caractéristique est parfois évaluée, comme dans (Rekiek, 2001), par :

$$SSL_{ecrt2} = \sum_{k=1}^m (T_k - \tilde{T})^2$$

Dans la littérature, deux types de « smoothness » sont parfois distingués, à savoir : « vertical » et « horizontal » (Becker *et al.*, 2006; Boysen *et al.*, 2008). Dans le premier cas, il s'agit d'équilibrer les charges de différents postes de travail, c'est-à-dire l'écart « vertical » entre la charge moyenne et la charge de chaque poste (Moodie *et al.*, 1965; Rachamadugu *et al.*, 1991; Kim *et al.*, 1998; Pastor *et al.*, 2000; Pinnoi *et al.*, 1997). Le deuxième cas s'applique aux lignes fabriquant des produits différents, pour lesquelles la charge du même poste de travail peut varier d'un cycle à l'autre, c'est-à-dire d'un produit à l'autre, il convient alors de minimiser la déviation « horizontale » entre les charges du même poste de travail. Une telle fonction objectif a été utilisée, par exemple, dans (Agnētis *et al.*, 1995; Simaria *et al.*, 2004; Kara *et al.*, 2007). Ces deux objectifs de l'équilibrage « vertical » et « horizontal » peuvent être considérés ensemble comme dans (Miltenburg, 1998; Merengo *et al.*, 1999; Matanachai *et al.*, 2001; Pastor *et al.*, 2002; Vilarinho *et al.*, 2002). Une comparaison de différents critères analysant l'équilibrage a été présentée dans (Venkatesh, 2008).

• Le critère de « work relatedness » est utilisé s'il est souhaitable que les opérations relatives aux mêmes fonctions du produit soient affectées au même poste de travail (Agrawal, 1985). Pour le mesurer, le paramètre « index of work relatedness » (*IWR*) est introduit, dont la valeur est à maximiser et peut être calculée comme suit :

$$IWR = \frac{m}{\sum_{k=1}^m SN_k}$$

où SN_k est le nombre de sous-ensembles d'opérations affectés au poste de travail k tels qu'il n'existe aucun lien de précedence entre les opérations appartenant à des sous-ensembles différents.

- La fonction objectif suivante, dont la valeur est à maximiser, est souvent utilisée lorsque les temps opératoires sont représentés par des variables aléatoires :

$$Pr = \prod_{k=1}^m Pr[c_j(k) \leq T_0]$$

Il s'agit de maximiser la probabilité Pr que la charge d'aucun poste de travail ne dépassera le temps de cycle T_0 , sachant que $Pr[c_j(k) \leq T_0]$ représente la probabilité que la charge du poste de travail k ne dépassera pas le temps de cycle T_0 (McMullen *et al.*, 1997; Bukchin *et al.*, 2002a).

- Il existe une classe de fonctions objectif (à maximiser ou à minimiser) qui sont basées sur les coûts liés aux attributs de postes de travail et/ou des coûts engendrés par les opérations affectées aux postes de travail. Ces derniers sont généralement exprimés par les caractéristiques de postes de travail. Ces fonctions peuvent utiliser des opérateurs de somme, de multiplication, de division, et elles ne sont pas toujours linéaires. On peut présenter la forme générale de telles fonctions objectif comme suit :

$$\sum_{k=1}^m f_1(A(k)) + \sum_{k=1}^m f_2(C(k))$$

où le premier terme représente la part engendrée par les attributs $A(k)$ et le deuxième donne la part relative aux caractéristiques des postes $C(k)$.

Les fonctions de ce type sont souvent utilisées lorsqu'on vise à optimiser à la fois les coûts liés à l'installation et à l'utilisation de la ligne. Cette classe de problèmes est connue dans la littérature anglo-saxonne sous le nom *Cost oriented Assembly Line Balancing Problem* (CALBP). Un état de l'art des travaux consacrés au CALBP et une analyse des coûts possibles ont été présentés dans (Amen, 2000a; Amen, 2000b; Amen, 2006). Les coûts peuvent être engendrés par l'investissement (liés aux achats des équipements, à l'installation des stations de travail, etc.), ou par son fonctionnement (salaires des opérateurs). Ces coûts peuvent être intégrés dans la fonction objectif soit par le biais des attributs associés aux postes de travail, comme le coût d'équipement qui ne dépend pas des opérations effectuées, soit en utilisant des caractéristiques de postes de travail qui permettent d'estimer les coûts liés à l'exécution des opérations et/ou des salaires des opérateurs.

- S'il s'agit de rééquilibrer une ligne, la fonction objectif peut porter sur la différence entre la répartition initiale des opérations et la nouvelle solution, cette différence est à minimiser (Gamberini *et al.*, 2006; Gamberini *et al.*, 2009).

7.3. Problèmes d'optimisation multiobjectif

Un problème d'optimisation peut comporter non pas une seule, mais un ensemble de fonctions objectif. Dans ce cas, il s'agit d'un problème d'optimisation multiobjectif. Il existe plusieurs façons de résoudre un tel problème. Dans la Section 8.3, nous présentons celles qui ont déjà été appliquées pour la résolution des problèmes de configuration des lignes de fabrication.

8. Résolution des problèmes d'équilibrage

Deux classes de méthodes d'optimisation combinatoire sont utilisées dans la littérature pour la résolution des problèmes d'équilibrage des lignes de production, à savoir : les méthodes exactes et les méthodes approchées (ou heuristiques). Comme leurs noms l'indiquent, les méthodes de la première classe visent à trouver « exactement » la meilleure solution. Malheureusement, elles demandent souvent un temps de calculs très important. Les méthodes approchées se contentent de la recherche de solutions de bonne qualité et elles ne garantissent pas l'optimalité de la meilleure solution trouvée. Elles sont utilisées lorsque le temps nécessaire pour la résolution exacte n'est pas compatible avec le contexte de la prise de décision. L'utilisation d'un algorithme heuristique a pour but de gagner en temps de résolution, mais ceci est souvent au détriment de la qualité de la solution finale. Il est toutefois possible d'obtenir des solutions optimales ou très proches de l'optimum en faisant appel à des heuristiques élaborées.

Il est à noter que la(les) solution(s) obtenue(s) suite à la résolution des problèmes d'équilibrage des lignes de production peuvent être complétées par des tests de simulation permettant d'étudier le comportement dynamique de la ligne de production lors de son fonctionnement. De tels travaux ont été présentés dans (McMullen *et al.*, 1999; Lee *et al.*, 2000; Hsieh, 2002; Mendes *et al.*, 2005; Sheu *et al.*, 2008).

8.1. Méthodes exactes

Les approches exactes utilisées dans la littérature pour la résolution des problèmes de configuration des lignes de fabrication se déclinent en deux catégories :

1) Les approches ayant recours à une bibliothèques d'optimisation, comme celles des logiciels ILOG Cplex, ILOG Solver, Dash Xpress MP, Lindo, GAMS, OSL, etc. Pour appliquer une telle approche, il faut d'abord étudier le problème minutieusement en vue de le modéliser de telle manière que les outils disponibles dans la bibliothèque choisie soient capables de le résoudre de façon efficace. Ici, nous n'abordons pas la modélisation mathématique des problèmes d'optimisation en général, pour cet aspect, voir par exemple (Williams, 1993). En fonction de la structure du problème à résoudre et de sa modélisation mathématique proposée, diverses approches de résolution s'appuyant sur une bibliothèque d'optimisation sont envisageables, comme par exemple :

- Procédures par Séparation et Évaluation (PSE ou « branch and bound », procédures par Séparation et Coupe (PSC ou « branch and cut») en utilisant ILOG Cplex (Andrés *et al.*, 2008; Belmokhtar *et al.*, 2006; Corominas *et al.*, 2008; Dolgui *et al.*, 2006b; Miralles *et al.*, 2007; Ağpak *et al.*, 2007; Choi, 2009; Kim *et al.*, 2009), notamment PSE avec LP relaxation (Pastor *et al.*, 2009), LINGO (Toksari *et al.*, 2009), XPressMP (Scholl *et al.*, 2009a) ou à l'aide d'OSL (IBM optimisation subroutine library) (Pinoi *et al.*, 1997; Gadidov *et al.*, 2000);

- génération de colonnes en utilisant OSL (Wilhelm, 1999);
- programmation par contraintes à l'aide d'ILOG Solver (Belmokhtar, 2006).

Bien que les bibliothèques d'optimisation soient développées afin de permettre la résolution efficace d'un large spectre de problèmes d'optimisation, généralement, l'utilisateur peut y ajouter du code supplémentaire pour rendre la résolution encore plus efficace.

2) Toutes ces approches de résolution peuvent être implémentées sans recourir à une bibliothèque d'optimisation. Dans ce cas, il convient non seulement de modéliser le problème, mais aussi de développer et d'implémenter l'algorithme de résolution. Généralement, de telles méthodes sont plus difficiles à mettre en place, mais elles peuvent être mieux adaptées à un problème particulier et tenir compte plus facilement de ses propriétés. Les méthodes de cette catégorie qui ont été mises en place pour la résolution des problèmes de configuration des lignes de production se basent le plus souvent sur :

- les procédures par séparation et évaluation, parmi les algorithmes les plus connus nous pouvons évoquer FABLE (Johnson, 1988), EUREKA (Hoffman, 1992; Hoffman, 1993), SALOME (Scholl *et al.*, 1997; Scholl *et al.*, 1999a) et ses variantes (Scholl *et al.*, 2009a; Scholl *et al.*, 2009b; Scholl *et al.*, 2009a); nous pouvons également citer quelques publications plus récentes comme (Bukchin *et al.*, 2006; Chiang *et al.*, 2007; Liu *et al.*, 2008; Miralles *et al.*, 2008; Pekin *et al.*, 2008; Wu *et al.*, 2008; Ege *et al.*, 2009; Dolgui *et al.*, 2009b; Dolgui *et al.*, 2009a);

- la programmation dynamique, par exemple, (Jackson, 1956; Held *et al.*, 1963; Bard, 1989), souvent basée sur la recherche du plus court chemin sous contraintes, par exemple, (Gutjahr *et al.*, 1964; Easton *et al.*, 1989; Faaland *et al.*, 1992; Erel *et al.*, 1999; Dolgui *et al.*, 2005b; Dolgui *et al.*, 2006c; Dolgui *et al.*, 2008b).

8.2. Méthodes approchées

Les heuristiques ou méthodes approchées ne garantissent pas que la solution qu'elles fournissent soit optimale, mais de manière générale, elles donnent de bons résultats, souvent plus ou moins proches de l'optimum. Elles sont utilisées pour des problèmes de grande taille ou lorsque le temps de calcul alloué est limité. Plusieurs classifications des méthodes approchées pour la résolution des problèmes d'équilibrage des lignes d'assemblage ont été proposées dans la littérature, notamment dans

(Talbot *et al.*, 1986; Boctor, 1995; Scholl *et al.*, 2006). Nous classons ces méthodes en trois catégories suivantes :

1) Les heuristiques s'appuyant sur des règles de priorité. Il en existe un certain nombre dans la littérature : elles se différencient par la(les) règle(s) employée(s). Nous plaçons dans cette catégorie :

- les approches gloutonnes : ces algorithmes effectuent une seule tentative d'affectation des opérations en s'appuyant sur une règle intuitive de choix du meilleur candidat à chaque fois qu'une opération doit être affectée (Raouf *et al.*, 1982; Toksari *et al.*, 2008).

- les approches semi-gloutonnes : ces algorithmes effectuent plusieurs itérations de l'affectation d'opérations pour pouvoir mieux exploiter l'ensemble de solutions admissibles et y trouver une solution de bonne qualité. Pour que cela soit possible, la méthode de construction de la liste de candidats et/ou de la sélection de l'opération à affecter doit permettre d'obtenir une solution différente à chaque itération. Souvent cela est atteint en recourant au facteur « hasard » par l'emploi de valeurs aléatoires (Arcus, 1966; Lapierre *et al.*, 2004; Dolgui *et al.*, 2005a; Toksari *et al.*, 2009). Un tel algorithme multi-passage procède jusqu'à la satisfaction d'un critère d'arrêt qui peut être exprimé en nombre maximum d'itérations, fixé au préalable, et/ou par le temps alloué, etc. À la fin de l'algorithme, le meilleur résultat de toutes les itérations est fourni comme la solution finale.

2) Métaheuristiques, cette appellation englobe les stratégies de résolution applicables à une large gamme de problèmes d'optimisation combinatoire (voire tous les problèmes). Une métaheuristique est définie par un squelette, constitué des opérateurs de base, qui représente son schéma général, indépendant de la nature du problème à résoudre. Leur application à un problème particulier consiste en l'adaptation des opérateurs de base aux particularités du problème. Parmi les métaheuristiques qui ont été employées pour la résolution de problèmes d'équilibrage se trouvent :

- les méthodes par voisinage comme la recherche Tabou (Chiang, 1998; Scholl *et al.*, 1996; Lapierre *et al.*, 2006; Özcan *et al.*, 2009b), méthode Kangourou (Minzu *et al.*, 1998), GRASP (Bautista *et al.*, 2000; Andrés *et al.*, 2008) et le recuit simulé (McMullen *et al.*, 1998; Vilarinho *et al.*, 2002; Erel *et al.*, 2001; Mendes *et al.*, 2005; Baykasoglu, 2006; Kara *et al.*, 2007; Özcan *et al.*, 2009c);

- les méthodes évolutionnistes comme les méthodes évolutionnaires (Nearchou, 2007; Nearchou, 2008) ou les algorithmes génétiques, très souvent employés, (Anderson *et al.*, 1994; Leu *et al.*, 1994; Rubinovitz *et al.*, 1995; Kim *et al.*, 1996; Kim *et al.*, 1998; Kim *et al.*, 2000c; Ponnambalam *et al.*, 2000; Simaria *et al.*, 2004; Sabuncuoglu *et al.*, 2000; Baykasoğlu *et al.*, 2007; Levitin *et al.*, 2006; Noorul Haq *et al.*, 2006; Wong *et al.*, 2006; Hwang *et al.*, 2008; Kulak *et al.*, 2008; Gao *et al.*, 2009; Hwang *et al.*, 2009; Kim *et al.*, 2009; Zhang *et al.*, 2009). Une comparaison des algorithmes génétiques pour ce type de problème a été présentée dans (Tasan *et al.*, 2008).

- les méthodes constructives comme les colonies de fourmis (McMullen *et al.*, 2003; McMullen *et al.*, 2006; Bautista *et al.*, 2007; Baykasoğlu *et al.*, 2008; Sabuncuoğlu *et al.*, 2009; Simaria *et al.*, 2009a; Simaria *et al.*, 2009b) ou des Beam-Aco, une hybridation des colonies avec Beam search (Blum, 2008).

3) Enfin, nous classons dans la troisième catégorie les méthodes effectuant une énumération incomplète de solutions, parmi lesquelles se trouvent :

- les méthodes qui exploitent des espaces restreints dans le graphe des états (Ege *et al.*, 2009; Bautista *et al.*, 2009) ou dans l'arbre d'énumération, par exemple, les méthodes utilisant l'énumération incomplète sur la base des réseaux de Pétri (Kilincci *et al.*, 2006; Kilincci *et al.*, 2008; Kilincci, 2009) ou l'heuristique proposée par Hoffmann pour le SALBP (Hoffman, 1963), ses modifications (Gehrlein *et al.*, 1978; Fleszar *et al.*, 2003) et ses adaptations pour d'autres types de problèmes (Dimitriadis, 2006; Hu *et al.*, 2008);

- les approches où la résolution exacte est restreinte par le temps disponible, par exemple une PSE tronquée (PSE H) qui s'arrête quand le temps alloué est révolu (Talbot *et al.*, 1986) ou qui n'exploite pas tous les nœuds (Bukchin *et al.*, 2000; Miralles *et al.*, 2008).

Puisque les méthodes appartenant à la première catégorie permettent de voir mieux les particularités des problèmes d'équilibrage, nous les présentons dans la section suivante de manière plus détaillée.

8.2.1. Heuristiques basées sur des règles de priorité

Selon l'ordre du traitement des opérations, les « approches orientées opérations » et les « approches orientées postes de travail » sont distinguées. Dans le premier cas, les opérations sont traitées dans l'ordre de leur priorité, qui est calculé selon un critère choisi. Lorsqu'une opération est sélectionnée, elle est affectée au poste le plus en amont où elle peut être accueillie sans enfreindre aucune contrainte du problème.

Cependant, il paraît que cette stratégie d'affectation est moins performante que celle orientée postes de travail (Scholl *et al.*, 2006), même si aucune démonstration n'a été encore faite. L'approche orientée postes de travail construit la liste *CL* des opérations-candidates, pouvant être affectées au poste courant. En utilisant une règle de priorité, une opération est ensuite sélectionnée dans cette liste et ajoutée dans la solution au poste courant. Son affectation entraîne la modification de la liste *CL*. Si $CL = \emptyset$ et il reste des opérations non affectées, alors un nouveau poste est ouvert et la liste *CL* est reconstruite. L'algorithme s'arrête lorsque toutes les opérations sont affectées.

Par rapport à la règle utilisée pour le choix d'une opération de la liste *CL*, il existe, comme nous l'avons déjà mentionné, des approches gloutonnes et des approches semi-gloutonnes. Il y a aussi des approches qui utilisent des règles composites, c'est-à-dire que plusieurs règles de priorité sont appliquées dans un ordre lexicographique, voir par exemple (Raouf *et al.*, 1982; Boctor, 1995). D'autres approches choisissent une règle à appliquer à l'itération courante de façon aléatoire.

La plupart des règles utilisent les éléments suivants pour calculer la priorité des opérations : le temps de l'opération t_i , le nombre de successeurs directs $SuccD(i)$, le nombre total de successeurs $SuccT(i)$, le poste au plus tôt (E_i) et le poste au plus tard (L_i) où l'opération i peut être affectée. Pour SALBP, la façon la plus simple pour calculer les valeurs des deux derniers paramètres est la suivante :

$$E_i = \left\lceil (t_i + \sum_{j \in PredT(i)} t_j) / T_0 \right\rceil, \quad L_i = m_0 + 1 - \left\lceil \sum_{j \in SuccT(i)} t_j / T_0 \right\rceil \quad [1]$$

où m_0 est une borne supérieure sur le nombre de postes de travail.

Dans le Tableau 2, nous recensons les règles de priorité les plus utilisées dans la littérature pour les problèmes de type SALBP. La fleche \uparrow signifie que l'opération avec la valeur maximale du paramètre correspondant est prioritaire. Au contraire, la fleche \downarrow signifie que l'opération avec la valeur minimale du paramètre correspondant est prioritaire.

Tableau 2: Règles de priorité

Règle de priorité	Formulation	Référence
RPW : Poids d'opération, pw (Ranked Positional Weight)	$\uparrow t_i + \sum_{j \in SuccT(i)} t_j$	(Helgeson <i>et al.</i> , 1961)
CRPW : Poids cumulé (Cumulated Positional Weight)	$\uparrow t_i + \sum_{j \in SuccT(i)} pw_j$	(Scholl <i>et al.</i> , 2006)
ARPW : Poids moyen (Average Ranked Positional Weight)	$\uparrow \frac{pw_j}{ SuccT(i) + 1}$	(Talbot <i>et al.</i> , 1986)
Temps opératoire	$\uparrow t_i$	(Moodie <i>et al.</i> , 1965)
	$\downarrow t_i$	(Boctor, 1995)
Numéro d'opération	$\downarrow i$	(Arcus, 1966)
Poste au plus tôt	$\downarrow E_i$	(Talbot <i>et al.</i> , 1986)
Poste au plus tard	$\downarrow L_i$	(Talbot <i>et al.</i> , 1986)
Marge d'affectation	$\downarrow L_i - E_i$	(Talbot <i>et al.</i> , 1986)
Temps opératoire divisé par le poste au plus tard	$\uparrow t_i / L_i$	(Talbot <i>et al.</i> , 1986)
Nombre de successeurs directs	$\uparrow SuccD(i) $	(Tonge, 1960)
Nombre total de successeurs	$\uparrow SuccT(i) $	(Talbot <i>et al.</i> , 1986)
Nombre total de successeurs divisé par la marge d'affectation	$\uparrow \frac{ SuccT(i) }{L_i - E_i}$	(Talbot <i>et al.</i> , 1986)

Poste au plus tard divisé par le nombre total de successeurs	$\downarrow \frac{L_i}{ SuccT(i) + 1}$	(Talbot <i>et al.</i> , 1986)
Nombre d'opérations affectables au poste après l'affectation de l'opération courante	$\uparrow C$	(Boctor, 1995)

8.3. Optimisation multi-objectif

Un problème d'optimisation peut comporter non pas une seule, mais un ensemble de fonctions objectif. Dans ce cas, il s'agit d'un problème d'optimisation multiobjectif. Il existe plusieurs façons de résoudre un tel problème. Dans la Section 8.3, nous présentons celles qui ont déjà été appliquées pour la résolution des problèmes de configuration des lignes de fabrication.

- **Agrégation des objectifs** : dans ce cas, les différents objectifs sont agrégés en un seul. Pour cela, il faut que tous les objectifs représentent des grandeurs d'unités comparables. De plus, il est nécessaire de déterminer des poids respectifs pour chacun de ces objectifs. En faisant la somme pondérée des différents objectifs, il est possible d'obtenir un problème d'optimisation mono-objectif. Cette façon de résoudre les problèmes multiobjectif a été utilisée, par exemple, dans (McMullen *et al.*, 2003; McMullen *et al.*, 2006; Baykasoğlu *et al.*, 2007; Hwang *et al.*, 2008; Wu *et al.*, 2008; Gamberini *et al.*, 2009; Hwang *et al.*, 2009; Simaria *et al.*, 2009a; Özcan *et al.*, 2009c).

- **Résolution lexicographique** : cette méthode consiste à considérer un ordre de priorité (dit lexicographique) entre les objectifs. Cette technique pour résoudre les problèmes multiobjectif a été utilisée, par exemple, dans (Lee *et al.*, 2001; Vilarinho *et al.*, 2002).

- **Goal programming** : cette méthode revient à s'approcher au maximum de valeurs cibles (aussi appelées niveaux d'aspiration) sur chacun des objectifs. Pour cela, des poids sont affectés à chaque objectif, et la somme pondérée des écarts (en excès comme en défaut) par rapport aux valeurs cibles doit être minimisée. Cette méthode a été appliquée, par exemple, dans (Gökçen *et al.*, 2006a; Baykasoğlu, 2006; Ağpak *et al.*, 2007; Choi, 2009; Özcan *et al.*, 2009d). Etant donné qu'il est souvent difficile à déterminer les valeurs cibles, « fuzzy goal programming » est utilisé si ces valeurs sont incertaines (Toklu *et al.*, 2008; Özcan *et al.*, 2009c).

- **Méthodes de surclassement** : ces méthodes sont utilisées pour comparer un ensemble de solutions. Par exemple, dans (Rekiek, 2001; Rekiek *et al.*, 2006) la méthode PROMETHEE II (Brans *et al.*, 1994) a été appliquée pour comparer les individus d'une génération créée par un algorithme génétique. Le principe de la méthode PROMETHEE II consiste à établir un processus de comparaison numérique de chaque solution par rapport à toutes les autres solutions. Ainsi il est possible de calculer le plus (mérite) ou le moins (démérite) de chaque solution par rapport à toutes les autres. Le

résultat de cette comparaison permet un classement ordonné des solutions. Un autre exemple est la méthode TOPSIS (Total Order Preference by Similarity to the Ideal Solution) (Gamberini *et al.*, 2006), où toutes les solutions sont comparées à la solution idéale.

- **Algorithmes évolutionnaires multi-objectif** Les méthodes intégrant la sélection selon plusieurs critères dans le processus de l'évolution des solutions. Pour ne citer que quelques exemples : MODE (multi-objective differential evolution) heuristique dans (Nearchou, 2008), HEMOAs (hybrid evolutionary multiple-objective algorithms) dans (Tseng *et al.*, 2008), MOGA (multiple-objective genetic algorithm) dans (Gamberini *et al.*, 2009).

- **Détermination de la frontière efficace** Ces méthodes cherchent à déterminer l'ensemble complet des solutions Pareto optimales du problème ou plus souvent l'ensemble minimum complet (sans les solutions équivalentes), par exemple, (McMullen *et al.*, 2006).

9. Conclusion

En analysant les travaux récemment publiés dans la littérature, nous pouvons faire des conclusions suivantes. Tout d'abord, nous pouvons souligner que des chercheurs continuent à étudier les problèmes de base : SALBP-1 (Blum, 2008) et SALBP-2 (Nearchou, 2007) avec de nouvelles méthodes.

En même temps, les améliorations des méthodes de résolution existantes ont permis aux chercheurs d'aborder la modélisation et la résolution des problèmes beaucoup plus difficiles, voir coupler plusieurs problèmes d'optimisation pour essayer d'atteindre des optimums globaux. De nombreux couplages ont été réalisés, par exemple : l'équilibrage et l'ordonnement des opérations affectées au même poste de travail (Kim *et al.*, 2000b; Kim *et al.*, 2000a; Miltenburg, 2002; Kara *et al.*, 2007; Özcan *et al.*, 2010); l'équilibrage et le séquençement de pièces assemblées sur la même ligne (Tseng *et al.*, 2008); l'équilibrage et l'affectation des opérateurs aux postes de travail (Simaria *et al.*, 2009b); le choix du processus opérationnel et l'équilibrage de la ligne (Capacho *et al.*, 2006; Capacho *et al.*, 2009). Nous pouvons supposer que des recherches vont continuer sur cette voie et que de nouveaux problèmes d'optimisation intégrant la prise de décisions sur différentes étapes de la conception des lignes de production apparaîtront dans les années à venir.

En ce qui concerne l'utilisation des méthodes de résolution, nous pouvons observer le développement des nouvelles méthodes de type PSE pour des problèmes plus complexes (Miralles *et al.*, 2008; Wu *et al.*, 2008; Dolgui *et al.*, 2009b; Dolgui *et al.*, 2009a) et l'utilisation assez fréquente des algorithmes évolutionnaires, notamment pour la résolution des problèmes multi-objectif.

Enfin, nous pouvons remarquer l'introduction des aspects sociaux et environnementaux dans les données et les contraintes des problèmes de conception des lignes de production, par exemple, la prise en considération des efforts physiques nécessaires

et des risques qu'ils représentent pour les opérateurs (Kara *et al.*, 2007), de l'effet « apprentissage » (Toksarı *et al.*, 2008; Toksarı *et al.*, 2009) ou de fatigue (Digiesi *et al.*, 2009) ainsi que l'aspect « compétences » des opérateurs (Wong *et al.*, 2006; Miralles *et al.*, 2008; Miralles *et al.*, 2007). Des enjeux environnementaux ont été introduits dans le problème de l'équilibrage des lignes de désassemblage (McGovern *et al.*, 2007). Une autre perspective de recherche concerne l'étude de la stabilité des solutions obtenues lors de la résolution des problèmes d'équilibrage des lignes de production.

10. Bibliographie

- Agnētis A., Ciancimino A., Lucertini M., Pizzichella M., « Balancing flexible lines for car components assembly », *International Journal of Production Research*, vol. 33, p. 333-350, 1995.
- Ağpak K., Gökçen H., « A chance-constrained approach to stochastic line balancing problem », *European Journal of Operational Research*, vol. 180, n° 3, p. 1098-1115, 2007.
- Ağpak K., Gökçen H., « Assembly line balancing: two resource constrained cases », *International Journal of Production Economics*, vol. 96, p. 129-140, 2005.
- Agrawal P., « The related activity concept in assembly line balancing », *International Journal of Production Research*, vol. 23, p. 403-421, 1985.
- Amen M., « An exact method for cost-oriented assembly line balancing », *International Journal of Production Economics*, vol. 64, p. 187-195, 2000a.
- Amen M., « Heuristic methods for cost-oriented assembly line balancing: A survey », *International Journal of Production Economics*, vol. 68, p. 1-14, 2000b.
- Amen M., « Heuristic methods for cost-oriented assembly line balancing: A comparison on solution quality and computing time », *International Journal of Production Economics*, vol. 69, p. 255-264, 2001.
- Amen M., « Cost-oriented assembly line balancing: Model formulations, solution difficulty, upper and lower bounds », *European Journal of Operational Research*, vol. 168, p. 747-770, 2006.
- Anderson E., Ferris M., « Genetic algorithms for combinatorial optimization: the assembly line balancing problem », *ORSA Journal on Computing*, vol. 6, p. 161-173, 1994.
- Andrés C., Miralles C., Pastor R., « Balancing and scheduling tasks in assembly lines with sequence-dependent setup times », *European Journal of Operational Research*, vol. 187, n° 3, p. 1212-1223, 2008.
- Arcus A., « COMSOAL: A computer method of sequencing operations for assembly lines », *International Journal of Production Research*, vol. 4, p. 259-277, 1966.
- Bard J., « Assembly line balancing with parallel workstations and dead time », *International Journal of Production Research*, vol. 27, p. 1005-1018, 1989.
- Bartholdi J., « Balancing two-sided assembly lines: A case study », *International Journal of Production Research*, vol. 31, p. 2447-2461, 1993.
- Bautista J., Pereira J., « Ant algorithms for assembly line balancing », *Lecture Notes in Computer Science*, vol. 2463, p. 65-75, 2002.

- Bautista J., Pereira J., « Ant algorithms for a time and space constrained assembly line balancing problem », *European Journal of Operational Research*, vol. 177, n° 3, p. 2016-2032, 2007.
- Bautista J., Pereira J., « A dynamic programming based heuristic for the assembly line balancing problem », *European Journal of Operational Research*, vol. 194, n° 3, p. 787-794, 2009.
- Bautista J., Suarez R., Mateo M., Companys R., « Local search heuristics for the assembly line balancing problem with incompatibilities between tasks », *Proceedings of the 2000 IEEE International Conference on Robotics and Automation*, San Francisco, CA, p. 2404-2409, 2000.
- Baybars I., « A survey of exact algorithms for the simple assembly line balancing », *Management Science*, vol. 32, p. 909-932, 1986.
- Baykasoglu A., « Multi-rule multi-objective simulated annealing algorithm for straight and U type assembly line balancing problems », *Journal of Intelligent Manufacturing*, vol. 17, n° 2, p. 217-232, 2006.
- Baykasoglu A., Dereli T., « Two-sided assembly line balancing using an ant-colony-based heuristic », *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, vol. 36, n° 5, p. 582-588, 2008.
- Baykasoglu A., Ozbakir L., « Stochastic U-line balancing using genetic algorithms », *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, vol. 32, n° 1, p. 139-147, 2007.
- Becker C., Scholl A., « A survey on problems and methods in generalized assembly line balancing », *European Journal of Operational Research*, vol. 168, p. 694-715, 2006.
- Belmokhtar S., Lignes d'usage avec équipements standard: modélisation, configuration et optimisation, PhD thesis, École Nationale Supérieure des Mines de Saint-Etienne, 2006.
- Belmokhtar S., Dolgui A., Guschinsky N., Levin G., « An integer programming model for logical layout design of modular machining lines », *Computers and Industrial Engineering*, vol. 51, p. 502-518, 2006.
- Belmokhtar S., Dolgui A., Ignatenko, Delorme X., « Optimizing modular machining line design problem with mixed activation mode of machining units », *Decision Making in Manufacturing and Services*, vol. 1, n° 1-2, p. 35-48, 2007.
- Bhattacharjee T., Sahu S., « Complexity of single model assembly line balancing problems », *Engineering Costs and Production Economics*, vol. 18, p. 203-214, 1990.
- Biskup D., « Single-machine scheduling with learning considerations », *European Journal of Operational Research*, vol. 115, n° 1, p. 173-178, 1999.
- Blum C., « Beam-ACO for simple assembly line balancing », *INFORMS Journal on Computing*, vol. 20, n° 4, p. 618, 2008.
- Docter F., « A Multiple-rule Heuristic for Assembly Line Balancing », *Journal of the Operational Research Society*, vol. 46, p. 62-69, 1995.
- Boucher T., « Choice of assembly line design under task learning », *International Journal of Production Research*, vol. 25, p. 513-524, 1987.
- Boysen N., Flidner M., « A versatile algorithm for assembly line balancing », *European Journal of Operational Research*, vol. 183, n° 2, p. 674-693, 2007.
- Boysen N., Flidner M., Scholl A., « A classification of assembly line balancing problems », *European Journal of Operational Research*, vol. 184, n° 1, p. 39-56, 2008.

- Brans J., Marechal B., « The PROMCALC & GAIA decision support system for multicriteria decision aid », *Decision Support Systems*, vol. 12, p. 297-310, 1994.
- Bukchin J., « A comparative study of performance measures for throughput of mixed model assembly line balancing in JIT environment », *International Journal of Production Research*, vol. 36, n° 10, p. 2669-2685, 1998.
- Bukchin J., Dar-El E., Rubinovitz J., « Mixed-model assembly line design in a make-to-order environment », *Computers and Industrial Engineering*, vol. 41, p. 405-421, 2002a.
- Bukchin J., Rubinovitz J., « A weighted Approach for the Assembly Line Design with Station Paralleling and Equipment Selection », *IIE Transactions*, vol. 35, n° 1, p. 513-524, 2002b.
- Bukchin J., Tzur M., « Design of flexible assembly line to minimize equipment cost », *IIE Transactions*, vol. 32, p. 585-598, 2000.
- Bukchin Y., Rabinowitch I., « A branch-and-bound based solution approach for the mixed-model assembly line-balancing problem for minimizing stations and task duplication costs », *European Journal of Operational Research*, vol. 174, p. 492-508, 2006.
- Buxey G., « Assembly line balancing with multiple stations », *Management Science*, vol. 20, p. 1010-1021, 1974.
- Buxey G., Slack N., Wild R., « Production Flow Line System Design-A review », *AIIE Transactions*, vol. 5, p. 37-48, 1973.
- Capacho L., Pastor R., « The ASALB Problem with Processing Alternatives Involving Different Tasks: Definition, Formalization and Resolution », *Lecture Notes in Computer Science*, vol. 3982, p. 554-563, 2006.
- Capacho L., Pastor R., Dolgui A., Guschinskaya O., « An Evaluation of Constructive Heuristic Methods to Solve the Alternative Subgraphs Assembly Line Balancing Problem », *Journal of Heuristics*, vol. 15, n° 2, p. 109-132, 2009.
- Carraway R., « A dynamic programming approach to stochastic assembly line balancing », *Management Science*, vol. 35, p. 459-471, 1989.
- Chakravarty A., « Line balancing with task learning effects », *IIE Transactions*, vol. 20, p. 186-193, 1988.
- Chan K., Hui P., Yeung K., Ng F., « Handling the assembly line balancing problem in the clothing industry using a genetic algorithm », *International Journal of Clothing Science and Technology*, vol. 10, n° 1, p. 21-37, 1998.
- Chen R.-S., Lu K.-Y., Yu S.-C., « A hybrid genetic algorithm approach on multi-objective of assembly planning problem », *Engineering Applications of Artificial Intelligence*, vol. 15, p. 447-457, 2002.
- Chiang W., « The application of a tabu search metaheuristic to the assembly line balancing problem », *Annals of Operations Research*, vol. 77, n° 1, p. 209-227, 1998.
- Chiang W., Kouvelis P., Urban T., « Line balancing in a just-in-time production environment: balancing multiple U-lines », *IIE Transactions*, vol. 39, n° 4, p. 347-359, 2007.
- Chiang W., Urban T., « The stochastic U-line balancing problem: A heuristic procedure », *European Journal of Operational Research*, vol. 175, n° 3, p. 1767-1781, 2006.
- Choi G., « A goal programming mixed-model line balancing for processing time and physical workload », *Computers & Industrial Engineering*, vol. 57, n° 1, p. 395-400, 2009.
- Chow W. (ed.), *Assembly line design: methodology and applications*, Marcel Dekker Inc., New York, Basel,, 1990.

- Cohen Y., Dar-El M., « Optimizing the number of stations in assembly lines under learning for limited production », *Production Planning and Control*, vol. 9, n° 3, p. 230-240, 1998.
- Corominas A., Pastor R., Plans J., « Balancing assembly line with skilled and unskilled workers », *Omega*, vol. 36, n° 6, p. 1126-1132, 2008.
- Dagnino A., « Integrated Architecture for Assembly Planning in an Electronics Manufacturing Environment », *Integrated Manufacturing Systems*, vol. 5, n° 4/5, p. 77-86, 1994.
- Deckro R., « Balancing cycle time and workstations », *IIE Transactions*, vol. 21, p. 106-111, 1989.
- Digiesi S., Kock A., Mummolo G., Rooda J., « The effect of dynamic worker behavior on flow line performance », *International Journal of Production Economics*, vol. 120, n° 2, p. 368-377, 2009.
- Dimitriadis S., « Assembly line balancing and group working: A heuristic procedure for workers' groups operating on the same product and workstation », *Computers and Operations Research*, vol. 33, p. 2757-2774, 2006.
- Dolgui A., Finel B., Guschinskaya O., Guschinsky N., Levin G., Vernadat F., « Balancing large-scale machining lines with multi-spindle heads using decomposition », *International Journal of Production Research*, vol. 44, n° 18-19, p. 4105-4120, 2006a.
- Dolgui A., Finel B., Guschinsky N., Levin G., Vernadat F., « A heuristic approach for transfer lines balancing », *Journal of Intelligent Manufacturing*, vol. 16, n° 2, p. 159-171, 2005a.
- Dolgui A., Finel B., Guschinsky N., Levin G., Vernadat F., « Mip approach to balancing transfer lines with blocks of parallel operations », *IIE Transactions*, vol. 38, p. 869-882, 2006b.
- Dolgui A., Guschinskaya O., Guschinsky N., Levin G., « Conception de systèmes de fabrication : prototype d'un logiciel d'aide à la décision », *Journal of Decision Systems*, vol. 14, n° 4, p. 489-516, 2005b.
- Dolgui A., Guschinsky N., Levin G., « A Special Case of Transfer Lines Balancing by Graph Approach », *European Journal of Operational Research*, vol. 168, n° 3, p. 732-746, 2006c.
- Dolgui A., Guschinsky N., Levin G., « Exact and Heuristic Algorithms for Balancing Transfer Lines when a Set of Available Spindle Heads is Given », *International Transactions in Operational Research*, vol. 15, n° 3, p. 339-357, 2008a.
- Dolgui A., Guschinsky N., Levin G., Proth J., « Optimisation of multi-position machines and transfer lines, European Journal of Operational Research », *European Journal of Operational Research*, vol. 185, n° 3, p. 1375-1389, 2008b.
- Dolgui A., Ihnatsenka I., « Balancing modular transfer lines with serial-parallel activation of spindle heads at stations », *Discrete Applied Mathematics*, vol. 157, n° 1, p. 68-89, 2009a.
- Dolgui A., Ihnatsenka I., « Branch and Bound Algorithm for a Transfer Line Design Problem: Stations with Sequentially Activated Multi-spindle Heads », *European Journal of Operational Research*, vol. 197, n° 3, p. 1119-1132, 2009b.
- Dolgui A., Proth J., *Les systèmes de production modernes*, Lavoisier, 2006d.
- Driscoll J., Thilakawardana D., « The definition of assembly line balancing difficulty and evaluation of balance solution quality », *Robotics and Computer Integrated Manufacturing*, vol. 17, p. 81-86, 2001.
- Easton F., Faaland B., Klastorin T., Schmitt T., « Improved network based algorithms for the assembly line balancing problem », *International Journal of Production Research*, vol. 27, p. 1901-1915, 1989.

- Ege Y., Azizoglu M., Ozdemirel N., « Assembly line balancing with station paralleling », *Computers & Industrial Engineering*, 2009. In Press.
- Erel E., Gökçen H., « Shortest route formulation of mixed-model assembly line balancing problem », *European Journal of Operational Research*, vol. 116, p. 194-204, 1999.
- Erel E., Sabuncuoglu I., Aksu B., « Balancing of U-type assembly systems using simulated annealing », *International Journal of Production Research*, vol. 39, n° 13, p. 3003-3015, 2001.
- Erel E., Sarin S., « A survey of the assembly line balancing procedures », *Production Planning and Control*, vol. 9, n° 5, p. 414-434, 1998.
- Essafi M., Delorme X., Dolgui A., « Balancing machining lines : a two-phase heuristic », *Studies in Informatics and Control*, 2010. In Press.
- Essafi M., Delorme X., Dolgui A., Guschinskaya O., « A MIP Approach for Balancing Transfer Lines with Complex Industrial Constraints », *Computers and Industrial Engineering*, 2009. In Press.
- Faaland B., Klasterin T., Schmitt T., Shtub A., « Assembly Line Balancing with Resource Dependent Task Times* », *Decision Sciences*, vol. 23, n° 2, p. 343-364, 1992.
- Finel B., Structuration de lignes d'usinage : méthodes exactes et heuristiques, PhD thesis, Université de Metz, 2004.
- Finel B., Dolgui A., Vernadat F., « A Random Search and Backtracking Procedure for Transfer Line Balancing », *International Journal of Computer Integrated Manufacturing*, vol. 21, n° 4, p. 376-387, 2008.
- Fleszar K., Hindi K., « An enumerative heuristic and reduction methods for the assembly line balancing problem », *European Journal of Operational Research*, vol. 145, p. 606-620, 2003.
- Gadidov R., Wilhelm W., « A cutting plane approach for the single-product assembly system design problem », *International Journal of Production Research*, vol. 38, n° 8, p. 1731-1754, 2000.
- Gamberini R., Gebennini E., Grassi A., Regattieri A., « A multiple single-pass heuristic algorithm solving the stochastic assembly line rebalancing problem », *International Journal of Production Research*, vol. 47, n° 8, p. 2141-2164, 2009.
- Gamberini R., Grassi A., Rimini B., « A new multi-objective heuristic algorithm for solving the stochastic assembly line re-balancing problem », *International Journal of Production Economics*, vol. 102, p. 226-243, 2006.
- Gao J., Sun L., Wang L., Gen M., « An efficient approach for type II robotic assembly line balancing problems », *Computers & Industrial Engineering*, vol. 56, n° 3, p. 1065-1080, 2009.
- Gehrlein W., Patterson J., « Balancing Single Model Assembly Lines: Comments on a Paper by E.M. Dar-El (Mansoor) », *AIIE Transactions*, vol. 10, p. 109-112, 1978.
- Ghosh S., Gagnon R., « A comprehensive literature review and analysis of the design, balancing and scheduling of assembly lines », *International Journal of Production Research*, vol. 27, n° 4, p. 637-670, 1989.
- Gökçen H., Ağpak K., « A goal programming approach to simple U-line balancing problem », *European Journal of Operational Research*, vol. 171, p. 577-585, 2006a.

- Gökçen H., Ağpak K., Benzer R., « Balancing of parallel assembly lines », *International Journal Production Economics*, vol. 103, p. 600-609, 2006b.
- Graves S., Lamar B., « An integer programming procedure for assembly design problems », *Operations Research*, vol. 31, n° 3, p. 522-545, 1983.
- Graves S., Redfield C., « Equipment selection and task assignment for multiproduct assembly system design », *The International Journal of Flexible Manufacturing Systems*, vol. 1, p. 31-50, 1988.
- Guschinskaya O., Dolgui A., « A comprehensive comparative analysis of exact and heuristic methods For Transfer Line Balancing Problems », *International Journal of Production Economics*, vol. 120, n° 2, p. 276-286, 2009.
- Guschinskaya O., Dolgui A., Guschinsky N., Levin G., « A scheduling problem for multi-spindle head machines with a mobile table », *Computers and Operations Research*, vol. 36, n° 2, p. 344-357, 2007.
- Guschinskaya O., Dolgui A., Guschinsky N., Levin G., « A Heuristic Multi-Start Decomposition Approach », *European Journal of Operational Research*, vol. 189, n° 3, p. 902-913, 2008.
- Gutjahr A., Nemhauser G., « An algorithm for the line balancing problem », *Management Science*, vol. 11, p. 308-315, 1964.
- He D., Kusiak A., « Designing an assembly line for modular products », *Computers and Industrial Engineering*, vol. 34, n° 1, p. 37-52, 1998.
- Held M., Karp R., Shreshian R., « Assembly line balancing dynamic programming with precedence constraints », *Operations Research*, vol. 11, p. 442-459, 1963.
- Helgeson W., Birnie D., « Assembly Line Balancing Using Ranked Positional Weight Technique », *Journal of Industrial Engineering*, vol. 12, p. 394-398, 1961.
- Hoffman T., « Assembly Line Balancing with a Precedence Matrix », *Management Science*, vol. 9, p. 551-562, 1963.
- Hoffman T., « EUREKA: A hybrid system for assembly line balancing », *Management Science*, vol. 38, p. 39-47, 1992.
- Hoffman T., « Response to note on microcomputer performance of "FABLE" on Hoffmann's data sets », *Management Science*, vol. 39, p. 1192-1193, 1993.
- Hop N. V., « A heuristic solution for fuzzy mixed-model line balancing problem », *European Journal of Operational Research*, vol. 168, p. 789-810, 2006.
- Hsieh S., « Hybrid analytic and simulation models for assembly line design and production planning », *Simulation Modelling Practice and Theory*, vol. 10, n° 1-2, p. 87-108, 2002.
- Hu X., Wu E., Jin Y., « A station-oriented enumerative algorithm for two-sided assembly line balancing », *European Journal of Operational Research*, vol. 186, n° 1, p. 435-440, 2008.
- Hwang R., Katayama H., « A multi-decision genetic approach for workload balancing of mixed-model U-shaped assembly line systems », *International Journal of Production Research*, vol. 47, n° 14, p. 3797-3822, 2009.
- Hwang R., Katayama H., Gen M., « U-shaped assembly line balancing problem with genetic algorithm », *International Journal of Production Research*, vol. 46, n° 16, p. 4637-4650, 2008.
- Ignall E., « A review of assembly line balancing », *The journal of industrial engineering*, vol. 16, p. 244-254, 1965.

- Jackson J., « A Computing Procedure for a Line Balancing Problem », *Management Science*, vol. 2, p. 261-271, 1956.
- Johnson J., « Optimally balancing large assembly lines with FABLE », *Management Science*, vol. 34, p. 240-253, 1988.
- Johnson R., « A branch and bound algorithm for assembly line balancing problems with formulation irregularities », *Management Science*, vol. 29, p. 1309-1324, 1983.
- Johnson R., « Balancing assembly lines for teams and work groups », *International Journal of Production Research*, vol. 29, n° 6, p. 1205-1214, 1991.
- Kahan T., Bukchin Y., Menassa R., Ben-Gal I., « Backup strategy for robots' failures in an automotive assembly system », *International Journal of Production Economics*, vol. 120, n° 2, p. 315-326, 2009.
- Kao E., « A preference order dynamic program for stochastic assembly line balancing », *Management Science*, vol. 22, p. 1097-1104, 1976.
- Kao E., « Computational experience with a stochastic assembly line balancing algorithm », *Computers and Operations Research*, vol. 6, p. 79-86, 1979.
- Kara Y., Özcan U., Peker A., « An approach for balancing and sequencing mixed-model JIT U-lines », *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, vol. 32, n° 11, p. 1218-1231, 2007.
- Kilincci O., « A Petri net-based heuristic for simple assembly line balancing problem of type 2 », *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 2009. In press, doi : 10.1007/s00170-009-2082-z.
- Kilincci O., Bayhan G., « A Petri net approach for simple assembly line balancing problems », *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, vol. 30, n° 11, p. 1165-1173, 2006.
- Kilincci O., Bayhan G., « A P-invariant-based algorithm for simple assembly line balancing problem of type-1 », *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, vol. 37, n° 3, p. 400-409, 2008.
- Kim H., Park S., « A strong cutting plane algorithm for the robotic assembly line balancing problem », *International Journal of Production Research*, vol. 33, n° 8, p. 2311-2323, 1995.
- Kim Y., Kim J., Kim Y., « A coevolutionary algorithm for balancing and sequencing in mixed model assembly lines », *Applied Intelligence*, vol. 13, n° 3, p. 247-258, 2000a.
- Kim Y., Kim S., Kim J., « Balancing and sequencing mixed-model U-lines with a co-evolutionary algorithm », *Production Planning & Control*, vol. 11, n° 8, p. 754-764, 2000b.
- Kim Y., Kim Y., Cho Y., « A heuristic-based genetic algorithm for workload smoothing in assembly lines », *Computers and Operations Research*, vol. 25, n° 2, p. 99-111, 1998.
- Kim Y., Kim Y., Kim Y., « Genetic algorithm for assembly line balancing problem with various objectives », *Computers and Industrial Engineering*, vol. 30, n° 3, p. 397-409, 1996.
- Kim Y., Kim Y., Kim Y., « Two-sided assembly line balancing: A genetic algorithm approach », *Production Planning and Control*, vol. 11, n° 3, p. 44-53, 2000c.
- Kim Y., Song W., Kim J., « A mathematical model and a genetic algorithm for two-sided assembly line balancing », *Computers and Operations Research*, vol. 36, n° 3, p. 853-865, 2009.
- Kulak O., Yilmaz I., Gunther H., « A GA-based solution approach for balancing printed circuit board assembly lines », *OR Spectrum*, vol. 30, n° 3, p. 469-491, 2008.

- Lapierre S., Ruiz A., « Balancing assembly lines: An industrial case study », *Journal of the Operational Research Society*, vol. 55, p. 589-597, 2004.
- Lapierre S., Ruiz A., Soriano P., « Balancing assembly lines with tabu search », *European Journal of Operational Research*, vol. 168, n° 3, p. 826-837, 2006.
- Lee H., Johnson R., « A line-balancing strategy for designing flexible assembly systems », *The International Journal of Flexible Manufacturing Systems*, vol. 3, p. 91-120, 1991.
- Lee S., Khoo L., Yin X., « Optimising an assembly line through simulation augmented by genetic algorithms », *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, vol. 16, n° 3, p. 220-228, 2000.
- Lee T., Kim Y., Kim Y., « Two-sided assembly line balancing to maximize work relatedness and slackness », *Computers and Industrial Engineering*, vol. 40, p. 273-292, 2001.
- Leu Y.-Y., Matheson L., Rees L., « Assembly line balancing using genetic algorithms with heuristic-generated initial populations and multiple evaluation criteria », *Decision Science*, vol. 25, p. 581-606, 1994.
- Levitin G., Rubinovitz J., Shnits B., « A genetic algorithm for robotic assembly line balancing », *European Journal of Operational Research*, vol. 168, p. 811-825, 2006.
- Liu S., Ng K., Ong H., « Branch-and-bound algorithms for simple assembly line balancing problem », *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, vol. 36, n° 1, p. 169-177, 2008.
- Liu S., Ong H., Huang H., « Two bi-directional heuristics for the assembly line type II problem », *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, vol. 22, n° 9, p. 656-661, 2003.
- Macaskill J., « Production-line balances for mixed-model lines », *Management Science*, vol. 19, p. 423-434, 1972.
- Mastor A., « An experimental investigation and comparative evaluation of production line balancing techniques », *Management science*, vol. 16, p. 728-746, 1970.
- Matanachai S., Yano C., « Balancing mixed-model assembly lines to reduce work overload », *IIE Transactions*, vol. 33, p. 29-42, 2001.
- McGovern S. M., Gupta S. M., « A balancing method and genetic algorithm for disassembly line balancing », *European Journal of Operational Research*, vol. 179, n° 3, p. 692-708, 2007.
- McMullen P., Frazier G., « A heuristic for solving mixed-model line balancing problems with stochastic task durations and parallel stations », *International Journal of Production Economics*, vol. 51, p. 177-190, 1997.
- McMullen P., Frazier G., « Using simulated annealing to solve a multiobjective assembly line balancing problem with parallel workstations », *International Journal of Production Research*, vol. 36, p. 2717-2741, 1998.
- McMullen P., Frazier G., « Using simulation and data envelopment analysis to compare assembly line balancing solutions », *Journal of Productivity Analysis*, vol. 11, n° 2, p. 149-168, 1999.
- McMullen P., Tarasewich P., « Using ant techniques to solve the assembly line balancing problem », *IIE Transactions*, vol. 35, p. 605-617, 2003.

- McMullen P., Tarasewich P., « Multi-objective assembly line balancing via a modified ant colony optimization technique », *International Journal of Production Research*, vol. 44, n° 1, p. 27-42, 2006.
- Mendes A., Ramos A., Simaria A., Vilarinho P., « Combining heuristic procedures and simulation models for balancing a PC camera assembly line », *Computers & Industrial Engineering*, vol. 49, n° 3, p. 413-431, 2005.
- Merengo C., Nava F., Pozetti A., « Balancing and sequencing manual mixed-model assembly lines », *International Journal of Production Research*, vol. 37, p. 2835-2860, 1999.
- Miltenburg J., « Balancing U-lines in a multiple U-line facility », *European Journal of Operational Research*, vol. 109, p. 1-23, 1998.
- Miltenburg J., « Balancing and scheduling mixed-model U-shaped production lines », *International Journal of Flexible Manufacturing Systems*, vol. 14, n° 2, p. 119-151, 2002.
- Miralles C., García-Sabater J., Andrés C., Cardos M., « Advantages of assembly lines in Sheltered Work Centres for Disabled. A case study », *International Journal of Production Economics*, vol. 110, n° 1-2, p. 187-197, 2007.
- Miralles C., García-Sabater J., Andrés C., Cardos M., « Branch and bound procedures for solving the assembly line worker assignment and balancing problem: Application to sheltered work centres for disabled », *Discrete Applied Mathematics*, vol. 156, n° 3, p. 352-367, 2008.
- Mínzu V., Henrioud J., « Stochastic algorithm for tasks assignment in single or mixed model assembly lines », *Journal Européen des Systèmes Automatisés*, vol. 32, n° 7-8, p. 831-851, 1998.
- Moodie C., Young H., « A heuristic method of assembly line balancing for assumptions of constant or variable work element times », *Journal of Industrial Engineering*, vol. 16, n° 1, p. 23-29, 1965.
- Moon I., Logendran R., Lee J., « Integrated assembly line balancing with resource restrictions », *International Journal of Production Research*, vol. 99999, n° 1, p. 1-17, 2008.
- Nearchou A., « Balancing large assembly lines by a new heuristic based on differential evolution method », *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, vol. 34, n° 9, p. 1016-1029, 2007.
- Nearchou A., « Multi-objective balancing of assembly lines by population heuristics », *International Journal of Production Research*, vol. 46, n° 8, p. 2275-2298, 2008.
- Nkasu M., Leung K., « A stochastic approach to assembly line balancing », *International Journal of Production Research*, vol. 33, p. 975-991, 1995.
- Noorul Haq A., Rengarajan K., Jayaprakash J., « A hybrid genetic algorithm approach to mixed-model assembly line balancing », *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, vol. 28, n° 3, p. 337-341, 2006.
- Özcan U., Cercioglu H., Gökçen H., Toklu B., « Balancing and sequencing of parallel mixed-model assembly lines », *International Journal of Production Research*, 2010. In Press.
- Özcan U., Toklu B., « A new hybrid improvement heuristic approach to simple straight and U-type assembly line balancing problems », *Journal of Intelligent Manufacturing*, vol. 20, n° 1, p. 123-136, 2009a.
- Özcan U., Toklu B., « A tabu search algorithm for two-sided assembly line balancing », *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, vol. 43, n° 7, p. 822-829, 2009b.

- Özcan U., Toklu B., « Balancing of mixed-model two-sided assembly lines », *Computers & Industrial Engineering*, vol. 57, n° 1, p. 217-227, 2009c.
- Özcan U., Toklu B., « Multiple-criteria decision-making in two-sided assembly line balancing: A goal programming and a fuzzy goal programming models », *Computers and Operations Research*, vol. 36, n° 6, p. 1955-1965, 2009d.
- Park K., Park S., Kim W., « A heuristic for an assembly line balancing problem with incompatibility, range and partial precedence constraints », *Computers and Industrial Engineering*, vol. 32, n° 2, p. 321-332, 1996.
- Pastor R., Andrés C., Duran A., Perez M., « Tabu search algorithms for an industrial multi-product and multi-objective assembly line balancing problem, with reduction of the task dispersion », *Journal of the Operational Research Society*, vol. 53, p. 1317-1323, 2002.
- Pastor R., Corominas A., « Assembly line balancing with incompatibilities and bounded workstation loads », *Ricerca Operativa*, vol. 30, p. 23-45, 2000.
- Pastor R., Ferrer L., « An improved mathematical program to solve the simple assembly line balancing problem », *International Journal of Production Research*, vol. 47, n° 11, p. 2943-2959, 2009.
- Pekin N., Azizoglu M., « Bi criteria flexible assembly line design problem with equipment decisions », *International Journal of Production Research*, vol. 46, n° 22, p. 6323-6343, 2008.
- Pinnoi A., Wilhelm W., « A branch and cut approach for workload smoothing on assembly lines », *INFORMS Journal on Computing*, vol. 9, p. 335-280, 1997.
- Pinto P., Dannenbring D., Khumawala B., « Branch and bound and heuristic procedures for assembly line balancing with paralleling of stations », *International Journal of Production Research*, vol. 19, p. 565-576, 1981.
- Ponnambalam S., Aravindan P., Naidu G., « A comparative evaluation of assembly line balancing heuristics », *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, vol. 15, p. 577-586, 1999.
- Ponnambalam S., Aravindan P., Naidu G., « A multi-objective genetic algorithm for solving assembly line balancing problem », *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, vol. 16, p. 341-352, 2000.
- Rachamadugu R., Talbot B., « Improving the equality of workload assignments in assembly lines », *International Journal of Production Research*, vol. 29, p. 619-633, 1991.
- Raouf A., Tsui C., « A new method for assembly line balancing having stochastic work elements », *Computers and Industrial Engineering*, vol. 6, p. 131-148, 1982.
- Rekiek B., *Assembly Line Design: multiple objective grouping genetic algorithm and the Balancing of mixed-model hybrid assembly line*, PhD thesis, Université Libre de Bruxelles, 2001.
- Rekiek B., Delchambre A., *Assembly Line Design. The Balancing of Mixed-Model Hybrid Assembly Lines with Genetic Algorithms*, Springer, 2006.
- Rekiek B., Dolgui A., Delchambre A., Bratcu A., « State of art of assembly lines design optimisation », *Annual Reviews in Control*, vol. 26, n° 2, p. 163-174, 2002a.
- Rekiek B., Lit P. D., Delchambre A., « Hybrid assembly line design and user's preferences », *International Journal of Production Research*, vol. 40, p. 1095-1111, 2002b.

- Rubinovitz J., Levitin G., « Genetic algorithm for assembly line balancing », *International Journal of Production Economics*, vol. 41, p. 343-354, 1995.
- Sabuncuoglu I., Erel E., Alp A., « Ant colony optimization for the single model U-type assembly line balancing problem », *International Journal of Production Economics*, vol. 120, n° 2, p. 287-300, 2009.
- Sabuncuoglu I., Erel E., Tanyer M., « Assembly line balancing using genetic algorithms », *Journal of Intelligent Manufacturing*, vol. 11, p. 295-310, 2000.
- Salveson M., « The assembly line balancing problem », *Journal of Industrial Engineering*, vol. 6, n° 3, p. 18-25, 1955.
- Sarin S., Erel E., Dar-El E., « A methodology for solving single-model, stochastic assembly line balancing problem », *OMEGA The International Journal of Management Science*, vol. 27, p. 525-535, 1999.
- Sarker B., Shanthikumar J., « A generalized approach for serial or parallel line balancing », *International Journal of Production Research*, vol. 21, p. 109-133, 1983.
- Sawik T., « Monolithic vs. hierarchical balancing and scheduling of a flexible assembly line », *European Journal of Operational Research*, vol. 143, p. 115-124, 2002.
- Scholl A., *Balancing and sequencing of assembly lines*, 2 edn, Physica, Heidelberg, 1999.
- Scholl A., Becker C., « State-of-the-art exact and heuristic solution procedures for simple assembly line balancing », *European Journal of Operational Research*, vol. 168, p. 666-693, 2006.
- Scholl A., Boysen N., « Designing parallel assembly lines with split workplaces: Model and optimization procedure », *International Journal of Production Economics*, vol. 119, n° 1, p. 90-100, 2009a.
- Scholl A., Boysen N., Fliedner M., « The sequence-dependent assembly line balancing problem », *OR Spectrum*, vol. 30, n° 3, p. 579-609, 2008.
- Scholl A., Fliedner M., Boysen N., « ABSALOM: Balancing assembly lines with assignment restrictions », 2009b, In Press.
- Scholl A., Klein R., « SALOME: A bidirectional branch and bound procedure for assembly line balancing », *INFORMS Journal on Computing*, vol. 9, p. 319-334, 1997.
- Scholl A., Klein R., « Balancing assembly lines effectively - A computational comparison », *European Journal of Operational Research*, vol. 114, p. 50-58, 1999a.
- Scholl A., Klein R., « ULINO: Optimally balancing U-shaped JIT assembly lines », *International Journal of Production Research*, vol. 37, p. 721-736, 1999b.
- Scholl A., Voß S., « Simple assembly line balancing – heuristic approaches », *Journal of Heuristics*, vol. 2, p. 217-244, 1996.
- Sheu D., Chen J., « Line balance analyses for system assembly lines in an electronic plant », *Production Planning & Control*, vol. 19, n° 3, p. 256-264, 2008.
- Shtub A., « The effect of incompleteness cost on line balancing with multiple manning of work stations », *International Journal of Production Research*, vol. 22, p. 235-245, 1984.
- Simaria A., Vilarinho P., « A genetic algorithm based approach to the mixed-model assembly line balancing problem of type II », *Computers & Industrial Engineering*, vol. 47, n° 4, p. 391-407, 2004.

- Simaria A., Vilarinho P., « 2-ANTBAL: An ant colony optimisation algorithm for balancing two-sided assembly lines », *Computers & Industrial Engineering*, vol. 56, n° 2, p. 489-506, 2009a.
- Simaria A., Zanella de Sá M., Vilarinho P., « Meeting demand variation using flexible U-shaped assembly lines », *International Journal of Production Research*, vol. 47, n° 14, p. 3937-3955, 2009b.
- Sniedovich M., « Analysis of a preference order assembly line problem », *Management Science*, vol. 27, p. 1067-1080, 1981.
- Sphicas G., Silverman F., « Deterministic equivalents for stochastic assembly line balancing », *AIIE Transactions*, vol. 8, p. 280-282, 1976.
- Suresh G., Sahu S., « Stochastic assembly line balancing using simulated annealing », *International Journal on Production Research*, vol. 32, n° 8, p. 1801-1810, 1994.
- Talbot F., Paterson J., Gehrlein W., « A comparative evaluation of heuristic line balancing techniques », *Management Science*, vol. 32, p. 430-454, 1986.
- Tasan S., Tunali S., « A review of the current applications of genetic algorithms in assembly line balancing », *Journal of Intelligent Manufacturing*, vol. 19, n° 1, p. 49-69, 2008.
- Toklu B., Özcan U., « A fuzzy goal programming model for the simple U-line balancing problem with multiple objectives », *Engineering Optimization*, vol. 40, n° 3, p. 191-204, 2008.
- Toksarı M., İşleyen S., Güner E., Baykoç O., « Simple and U-type assembly line balancing problems with a learning effect », *Applied Mathematical Modelling*, vol. 32, n° 12, p. 2954-2961, 2008.
- Toksarı M., İşleyen S., Güner E., Baykoç O., « Assembly line balancing problem with deterioration tasks and learning effect », 2009.
- Tonge F., « Summary of a heuristic line balancing procedure », *Management Science*, vol. 7, p. 21-39, 1960.
- Tseng H., Chen M., Chang C., Wang W., « Hybrid evolutionary multi-objective algorithms for integrating assembly sequence planning and assembly line balancing », *International Journal of Production Research*, vol. 46, n° 21, p. 5951-5977, 2008.
- Tsujimura Y., Gen M., Kubota E., « Solving fuzzy assembly-line balancing problem with genetic algorithms », *Computers and Industrial Engineering*, vol. 29, p. 543-547, 1995.
- Urban T., Chiang W., « An optimal piecewise-linear optimization of the U-line balancing problem with stochastic task times », *European Journal of Operational Research*, vol. 168, p. 771-782, 2006.
- Venkatesh J., « Evaluation of performance measures for representing operational objectives of a mixed model assembly line balancing problem », *International Journal of Production Research*, vol. 46, n° 22, p. 6367-6388, 2008.
- Vilarinho P., Simaria A., « A two-stage heuristic method for balancing mixed-model assembly lines with parallel workstations », *International Journal of Production Research*, vol. 40, p. 1405-1420, 2002.
- Wee T., Magazine M., « Assembly line balancing as generalized bin packing », *Operations Research Letters*, vol. 1, p. 56-58, 1986.
- Wei S.-Y., Lo C.-C., Chang C., « Using throughput profit for selecting manufacturing process plan », *Computers and Industrial Engineering*, vol. 32, n° 4, p. 939-948, 1997.

- Wilhelm W., « A column-generation approach for the assembly system design problem with tool changes », *International Journal of Flexible Manufacturing Systems*, vol. 11, p. 177-205, 1999.
- Williams H. (ed.), *Model building in mathematical programming*, John Wiley & Sons, 1993.
- Wilson J., « Formulation of a problem involving assembly lines with multiple manning of work stations », *International Journal of Production Research*, vol. 24, p. 59-63, 1986.
- Womer N., « Learning curves, production rate and program cost », *Management Science*, vol. 25, p. 312-319, 1979.
- Wong W., Mok P., Leung S., « Developing a genetic optimisation approach to balance an apparel assembly line », *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, vol. 28, n° 3, p. 387-394, 2006.
- Wu E., Jin Y., Bao J., Hu X., « A branch-and-bound algorithm for two-sided assembly line balancing », *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, vol. 39, n° 9, p. 1009-1015, 2008.
- Yelle L., « The learning curve: historical review and comprehensive survey », *Decision Sciences*, vol. 10, p. 302-328, 1979.
- Zhang W., Gen M., « An efficient multiobjective genetic algorithm for mixed-model assembly line balancing problem considering demand ratio-based cycle time », 2009, In Press.

Article reçu le 22/12/2009.

Version révisée le 22/12/2009.

Rédacteur responsable : GUILLAUME LAURENT

SERVICE ÉDITORIAL – HERMES-LAVOISIER
14 rue de Provigny, F-94236 Cachan cedex
Tél. : 01-47-40-67-67
E-mail : revues@lavoisier.fr
Serveur web : <http://www.revuesonline.com>