



RESOLUTION DU PROBLEME D'AFFECTION DES RESSOURCES HUMAINES AUX LIGNES D'ASSEMBLAGE

Sana Bouajaja, Najoua Dridi

► To cite this version:

Sana Bouajaja, Najoua Dridi. RESOLUTION DU PROBLEME D'AFFECTION DES RESSOURCES HUMAINES AUX LIGNES D'ASSEMBLAGE . MOSIM 2014, 10ème Conférence Francophone de Modélisation, Optimisation et Simulation, Nov 2014, Nancy, France. hal-01166592

HAL Id: hal-01166592

<https://hal.science/hal-01166592>

Submitted on 23 Jun 2015

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.

RESOLUTION DU PROBLEME D'AFFECTATION DES RESSOURCES HUMAINES AUX LIGNES D'ASSEMBLAGE

Sana BOUAJAJA, Najoua DRIDI

OASIS – Ecole Nationale d'Ingénieurs de Tunis
Université de Tunis Elmanar, BP. 37 le Belvédère, 1002, Tunis, Tunisie
sana_bouajaja@yahoo.fr, najoua.dridi@enit.rnu.tn

RESUME : *Malgré l'automatisation accrue des systèmes de production ces dernières années, le facteur humain s'impose comme l'un des éléments clés de la compétitivité des entreprises dans cet environnement en pleine mutation. Cette évolution du monde industriel a impliqué une perpétuelle remise en cause des méthodes de production et en particulier des méthodes de prise en compte des opérateurs. Dès lors, l'utilisation rationnelle des ressources humaines lors de l'organisation des activités devient l'une des inquiétudes des entreprises. En effet, l'emploi efficace de ces sources « naturelles » s'avère indispensable à la satisfaction des objectifs de performance imposée et de la bonne affectation de ces derniers dépend largement l'efficacité des processus. Nous traitons dans ce papier le problème d'affectation conjointe des ressources humaines et des opérations aux lignes d'assemblage. L'objectif étant la minimisation du temps de cycle. Nous proposons deux formulations inspirées des travaux de la littérature et une heuristique gloutonne basée sur des règles de priorité.*

MOTS-CLES : *Optimisation, Affectation, équilibrage, lignes d'assemblage, Ressources humaines*

1 INTRODUCTION

Il n'est plus question aujourd'hui de négliger la présence du facteur humain dans les organisations et les systèmes de production de biens et de services. En effet, l'homme est devenu une composante décisionnelle essentielle qui influence profondément la productivité de l'entreprise.

Conscients de ce fait, plusieurs chercheurs se sont intéressés à la gestion des ressources humaines et en particulier à la problématique d'affectation de ces ressources. Derrière cette problématique, se cache en réalité un ensemble de problèmes qui varient en fonction de l'objectif d'optimisation, des contraintes prises en compte...

Dans ce papier, nous mettons l'accent plus particulièrement sur le problème d'équilibrage des lignes d'assemblage en optimisant l'allocation des ressources humaines disponibles. Notre but est double, nous visons d'une part à affecter les opérations aux stations de travail et d'autre part à affecter les opérateurs aux stations, dans l'objectif de réduire le temps de cycle de la ligne et améliorer ainsi sa productivité. Pour résoudre ce problème, nous avons mis en place un algorithme de construction gloutonne basé sur des règles de priorité pour la sélection des opérations à affecter en premier et pour le choix des opérateurs. Cette méthode proposée a été testée sur un échantillon d'instances générées aléatoirement et d'autres issues de la littérature afin d'évaluer ses performances.

Le reste du papier est organisé comme suit : Dans la deuxième section, nous décrivons brièvement les problèmes qui relèvent du domaine de l'équilibrage des lignes d'assemblage et de l'optimisation de l'allocation des ressources humaines, ainsi que les approches offertes comme support d'aide à la décision. Dans la section 3, nous présentons notre problème (hypothèses, contraintes), ainsi que deux formulations mathématiques. Des bornes inférieures du temps de cycle, de la littérature, sont présentées dans la section 4. La section 5 est réservée à la présentation de l'heuristique que nous proposons. La dernière section présente les résultats d'une étude expérimentale permettant d'évaluer la méthode de résolution proposée. Nous terminons ce travail par une conclusion et des perspectives.

2 ETAT DE L'ART

2.1 Problème d'équilibrage des lignes d'assemblage

Le problème de l'équilibrage se pose pour tous les types de lignes de fabrication. Initialement, il a été formulé pour des lignes d'assemblage mono-produit, dans l'industrie automobile. L'objectif du problème est d'affecter les opérations aux stations de travail, de manière à satisfaire les contraintes de précédence, et que chaque opérateur ait le temps de réaliser, durant le temps de cycle, l'ensemble des opérations qui lui sont affectées. Dans la littérature, ce problème est connu sous le nom de

Simple Assembly Line Balancing Problem (SALBP) i.e. équilibrage des lignes d'assemblage.

Plusieurs modèles ont été énumérés par (Baybars, 1986):

- SALBP: où seules les contraintes les plus courantes sont considérées : le temps de cycle et la précedence.

Suite à la variation des objectifs, plusieurs versions du SALBP sont étudiées, nous citons par exemple:

- SALBP-1 : minimisation du nombre de stations avec un temps de cycle donné,
- SALBP-2 : minimisation du temps de cycle avec un nombre de stations donné,

La formulation du SALBP n'exprime pas toute la réalité industrielle à cause des hypothèses simplificatrices qu'elle comprend (Ghosh, 1989). De ce fait, des hypothèses plus générales ont été introduites, dans ce cas on parle de Generalized Assembly Line Balancing Problem (GALBP).

- GALBP: Ce modèle considère à la fois des contraintes courantes et d'autres moins usuelles : groupement d'opérations (opérations affectées sur la même station), incompatibilité (opérations à affecter à des stations différentes), stations parallèles (opérations réalisées par plusieurs stations), ...

2.2 Problème d'affectation des ressources humaines

La gestion optimale des ressources humaines joue un rôle important dans la productivité et la compétitivité des entreprises. Pour cette raison, le problème d'allocation des ressources humaines a fait l'objet de nombreuses études, étant donné qu'il touche plusieurs domaines comme la gestion de production (Corominas *et al.*, 2006), (Tan *et al.*, 2009), la gestion de la maintenance (Bennour *et al.*, 2005), (Dakkak *et al.* 2012), la gestion des projets (Selaru, 2012), (Certa, *et al.*, 2009), la gestion des systèmes hospitaliers (Lanzarone et Matta, 2014), (Schaus *et al.*, 2009), etc.

Dans ce travail, on s'intéresse à la problématique d'affectation des ressources humaines aux systèmes de production en milieu industriel, où on cherche à déterminer les assignations permettant de satisfaire un ou plusieurs objectifs de performance (qualité, financier, temporel).

Bien que plusieurs travaux académiques ont traités les deux problèmes présentés précédemment chacun à part, rares sont les études qui ont mis l'accent sur les deux problèmes simultanément. Nous citons particulièrement (Miralles *et al.*, 2008), (Chaves *et al.*, 2009), (Moreira and Costa, 2009), (Blum and Miralles, 2011), (Moreira and Costa, 2012), (Moreira *et al.*, 2012), (Araújo *et al.*, 2012), (Borba and Ritt, 2012), (Mutlu *et al.*, 2013), (Borba and Ritt, 2013), (Borba and Ritt, 2014), (Vilà and Pereira, 2014).

Ces études réalisées par la même équipe de travail couvrent tous le même thème portant sur l'affectation des opérateurs et l'équilibrage des lignes d'assemblage dans un contexte particulier, qui est le centre protégé des personnes handicapés (ALWABP in SWD- Assembly Line Worker Assignment and Balancing Problem in Sheltered Work centres for Disabled). Nous nous

inspirons de ces travaux dans la modélisation de notre problème.

Pour la résolution de ce problème à forte explosion combinatoire plusieurs méthodes ont été proposées dans la littérature (figure 1).

En fait, ALWABP est un problème NP-difficile. Vu que le problème SALBP, connu comme NP-difficile, est un cas particulier du ALWABP où chaque opération a un temps d'exécution fixe, alors ALWABP l'est aussi (Chaves *et al.*, 2007).

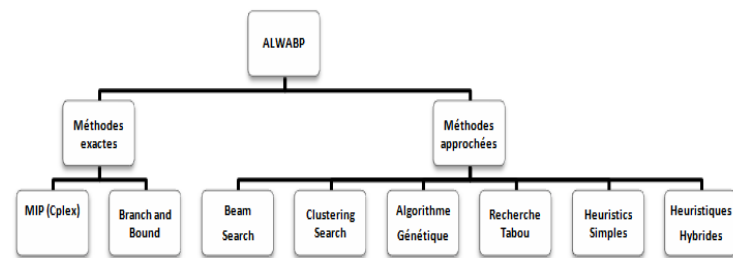


Figure 1 : Méthodes de résolution du ALWABP dans la littérature

Les méthodes de résolution du ALWABP, rencontrées dans la littérature, ne seront pas détaillées ici. Néanmoins, l'histogramme récapitulatif de la figure 1 permet de visualiser les différentes approches exactes, heuristiques et métaheuristiques utilisées.

C'est dans ce contexte d'étude que notre travail a été effectué. Nous ciblons le problème d'équilibrage des lignes d'assemblages et l'optimisation de l'affectation de leurs ressources humaines à la fois, mais avec des opérateurs sans handicap.

3 PRESENTATION DU PROBLEME

3.1 Problématique

Notre problème consiste à présenter une solution simultanément à une double affectation : (1) les opérations aux opérateurs disponibles et (2) les opérateurs aux stations. Cette solution doit garantir la réduction du temps de cycle de la ligne tout en respectant les différentes contraintes du problème, ce qui correspond à l'amélioration de la productivité de la ligne. Ce problème est appelé ALWABP-2 par analogie avec le SALBP-2.

3.2 Hypothèses et contraintes

Différentes hypothèses et contraintes sont considérées dans la résolution de notre problème :

1. la ligne est conçue pour un seul produit,
2. les stations de la ligne sont en série et sans stock tampon,
3. les temps opératoires sont déterministes,
4. les temps opératoires dépendent de la compétence de l'opérateur qui va les exécuter,

5. les relations de précédence doivent être respectées,
6. toutes les opérations doivent être exécutées,
7. une opération est exécutée sur une seule station
8. un opérateur est assigné à une seule station,
9. une station ne comporte qu'un seul opérateur.

3.3 Formulation mathématique

Afin de modéliser notre problème, nous exploitons les travaux de Miralles et son groupe de recherche en adaptant son modèle mathématique, proposé dans les papiers présentés auparavant, à notre problème.

Ce modèle est généralement valable pour les lignes d'assemblage où on souligne une variété dans les temps opératoires (Miralles *et al.*, 2008), ce qui correspond à notre cas d'étude.

Pour cette raison, nous avons omis les contraintes spécifiques au centre des personnes handicapés (SWD) où on tient compte de certaines incapacités des opérateurs à exécuter certaines opérations due à leur handicap. Après avoir effectué les modifications nécessaires sur le modèle d'origine, la formulation de notre problème sera sous la forme d'un programme linéaire en nombres entiers, qu'on a appelé Modèle 1.

3.3.1 Notation et paramètres

Notation	Description
i, j	Indice de l'opération
w	Indice de l'opérateur
s	Indice de la station
N	Ensemble des opérations
H	Ensemble des opérateurs disponibles
S	Ensemble des stations
C	Temps de cycle
m	Nombre de stations
T_{wi}	Temps opératoire de l'opération i si elle est exécutée par l'opérateur h
D_j	Ensemble des opérations qui précèdent directement l'opération j dans le graphe de précédence
X_{swi}	Variable binaire égale à 1 si l'opération i est affectée à l'opérateur w sur la station s
Y_{sw}	Variable binaire égale à 1 si l'opérateur w est affecté à la station s

Tableau 1 : Notations du Modèle 1

3.3.2 Formulations mathématiques

Modèle 1

Fonction objectif :

$$\text{Min } z = C \quad (1.1)$$

Sous contraintes :

$$\sum_{w \in H} \sum_{s \in S} X_{swi} = 1, \forall i \in N \quad (1.2)$$

$$\sum_{s \in S} Y_{sw} \leq 1, \forall w \in H \quad (1.3)$$

$$\sum_{w \in H} Y_{sw} \leq 1, \forall s \in S \quad (1.4)$$

$$\sum_{w \in H} \sum_{s \in S} s \cdot X_{swi} \leq \sum_{w \in H} \sum_{s \in S} s \cdot X_{swj}, \forall i, j, i \in D_j \quad (1.5)$$

$$\sum_{i \in N} T_{wi} \cdot X_{swi} \leq C, \forall w \in H, s \in S \quad (1.6)$$

$$\sum_{i \in N} X_{swi} \leq N \cdot Y_{sw}, \forall w \in H, \forall s \in S \quad (1.7)$$

Avec :

$$Y_{sw} \in \{0,1\} \forall s \in S, \forall w \in H$$

$$X_{swi} \in \{0,1\} \forall s \in S, \forall w \in H, \forall i \in N$$

La minimisation du temps de cycle est donnée dans (1.1). Les contraintes (1.2) expriment que chaque opération est assignée à une seule station et à un opérateur unique.

Les contraintes (1.3) et (1.4) assurent que chaque opérateur est assigné à une seule station et chaque station comporte un seul opérateur.

Les contraintes (1.5) permettent de respecter la relation de précédence entre l'opération i et j où i est un prédécesseur de j .

Les contraintes (1.6) permettent le calcul du temps de cycle C et les contraintes (1.7) permettent à un opérateur w assigné à une station s d'avoir plus d'une opération.

Afin de résoudre ce programme linéaire, nous avons utilisé le solveur CPLEX. Les résultats obtenus seront discutés en détails dans la partie étude expérimentale.

Un nouveau modèle, qu'on a appelé Modèle 2 a été récemment proposé pour résoudre le même problème ALWABP-2 traité par Miralles. Ce deuxième programme linéaire mixte en nombre entiers formulé par (Borba et Ritt, 2013) est basé sur l'observation qu'il suffit d'affecter les opérations aux opérateurs. Chaque opérateur sera identifié à une station. L'affectation des opérations aux opérateurs doit permettre de respecter les relations de précédence entre les opérations. Un graphe est généré au fur et à mesure qu'une affectation d'opération à une ressource humaine est faite. Ainsi, une relation de précédence entre les opérateurs est établie pour respecter les contraintes de précédence entre les opérations. Dans l'exemple de la figure 2, l'affectation des opérations $\{2,3\}$ à l'opérateur w_2 et $\{4\}$ à w_3 implique une relation de précédence entre w_2 et w_3 (w_2 prédécesseur de w_3). De même, l'affectation de $\{1\}$ à w_1 fait que w_1 doit précéder w_2 et w_3 .

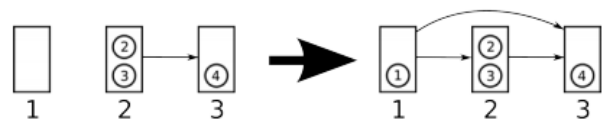
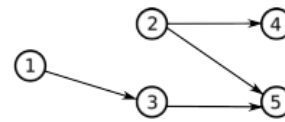


Figure 2 : Relation de précédence entre les opérateurs après l'affectation de l'opération 1 (Borba et Ritt, 2012)

Modèle 2

Notation	Description
i, j	Indice de l'opération
w	Indice de l'opérateur
N	Ensemble des opérations
H	Ensemble des opérateurs disponibles
C	Temps de cycle
$A_i \subseteq W$	Ensemble d'opérateurs pouvant exécuter i
$A_w \subseteq N$	Ensemble d'opérations faisable par w
T_{wi}	Temps opératoire de l'opération i si elle est exécutée par l'opérateur w
X_{swi}	Variable binaire égale à 1 si l'opération i est affectée à l'opérateur w sur la station s
d_{vw}	Variable binaire égale à 1 si l'opérateur v doit précéder l'opérateur w

Tableau 2 : Notations du Modèle 2

Fonction objectif :

$$\text{Min } z = C \quad (2.1)$$

Sous contraintes :

$$\sum_{i \in N} T_{iw} X_{iw} \leq C, \forall w \in H \quad (2.2)$$

$$\sum_{w \in H} X_{iw} = 1, \forall i \in N \quad (2.3)$$

$$d_{vw} \geq X_{iv} + X_{jw} - 1 \quad \forall (i, j) \in N, v \in A_i, w \in A_j \setminus \{v\} \quad (2.4)$$

$$d_{uw} \geq d_{uv} + d_{vw} - 1 \quad \forall \{v, u, w\} \subseteq H, |\{v, u, w\}| = 3 \quad (2.5)$$

$$d_{vw} + d_{wv} \leq 1 \quad \forall v \in H, w \in H \setminus \{v\} \quad (2.6)$$

Avec :

$$X_{iw} \in \{0,1\} \quad \forall w \in H, i \in A_w$$

$$d_{vw} \in \{0,1\} \quad \forall v \in H, w \in H \setminus \{v\}$$

Les contraintes (2.2) définissent le temps de cycle de la ligne. Les contraintes (2.3) assurent que chaque opération est exécutée par un seul opérateur. Les contraintes (2.4) reflètent les relations de dépendance entre les opérateurs : si une opération est affectée à l'opérateur v et elle est précédée de j qui est affectée à w donc v doit précéder w . Les contraintes (2.5) et (2.6) traduisent la transitivité et l'antisymétrie dans les relations de dépendances entre les opérateurs.

Pour la résolution de ce modèle, nous proposons un algorithme glouton qui, à chaque étape, effectue le meilleur choix d'affectation d'une opération à un opérateur.

4 BORNES INFÉRIEURES

Des bornes inférieures pour le temps de cycle ont été proposées dans la littérature (Borba et Ritt, 2013), (Blum et Miralles, 2011), (Miralles et al., 2008), afin de permettre d'évaluer la qualité des solutions obtenues.

Une première borne évidente BI_1 est obtenue en relaxant les temps opératoires et en considérant le cas où chaque opération est exécutée par l'opérateur le plus rapide.

$$BI_1 = \max_{i \in N} (\min_{w \in H} T_{iw})$$

On obtient une autre borne inférieure BI_2 en ignorant les contraintes de précédence et en considérant le cas idéal où chaque opération est affectée à l'opérateur le plus rapide:

$$BI_2 = \left\lceil \frac{\sum_{i \in N} \min_{w \in H} T_{iw}}{|H|} \right\rceil$$

Une borne inférieure BI du temps de cycle peut être définie par :

$$BI = \max(BI_1, BI_2)$$

5 METHODE DE RESOLUTION**5.1.1 Règles de priorité**

Pour les opérations ayant le même rang dans le graphe de précédence, autrement dit pouvant s'exécuter en parallèle, on peut avoir un conflit dans le choix de l'opération à assigner en premier. Dans ce cas, adopter une règle de priorité prédéfinie s'avère nécessaire. D'autres règles de priorité sont aussi à définir pour la sélection de l'opérateur qui va réaliser l'opération courante. L'allocation des opérations aux ressources humaines sera faite en se basant sur ces règles de priorité, dans le cas où deux ou plusieurs opérateurs sont disponibles pour la même opération.

5.2 Algorithme proposé**5.2.1 Notations**

Les relations de précédence entre les différentes opérations sont modélisées par la matrice d'adjacence $P[N][N]$ du graphe de précédence $G_p=(S,A)$, avec S l'ensemble des sommets, A l'ensemble des arcs et $N = |S|$ le nombre d'opérations. G_p est représenté par sa matrice d'adjacence G de taille $N \times N$ contenant les coefficients $P[i][j] = 1$ si $(i,j) \in A$, et $P[i][j] = 0$ sinon.

De même, une matrice de compétence $T_{iw}[H][H]$ de taille $H \times N$, où H est le nombre d'opérateurs à affecter et N le nombre d'opérations à exécuter, est donnée. Cette matrice contient les coefficients $T_{iw}[i][w]$ qui donne la durée prise par l'opérateur w pour exécuter l'opération i . Les relations de précédence définies entre les opérateurs au fur à mesure, après chaque affectation, sont traduites par une matrice d'adjacence $D_{uv}[H][H]$.

Nous utilisons aussi les notations suivantes :

L_a : Liste des opérations affectées,

L_n : Liste des opérations non encore affectées,

L_r : Liste courante des opérations à affecter de rang r , dont tous les prédécesseurs directs et indirectes sont déjà affectés, (respect de la précédence entre les opérations),

L_{iw} : Liste candidate des opérateurs w qui peuvent exécuter l'opération courante i de L_r à affecter, respectant la matrice de compétence,

5.2.2 Principe et étapes de l'algorithme

La première étape de l'algorithme glouton consiste à initialiser les listes à utiliser ($L_n=N$, $L_a=\emptyset$, $L_r=\emptyset$).

Ensuite, à chaque étape on commence par construire la liste L_r des opérations du graphe de précédence pouvant être affectées.

Une fois qu'une opération de L_r est affectée, elle est ajoutée à la liste L_a et supprimée de L_n . Quand toutes les opérations de L_r sont affectées, on passe aux opérations du rang suivant.

Pour chaque opération courante i de L_r , on définit la liste L_{iw} des opérateurs w qui ont la compétence de l'exécuter, en se référant à la matrice de compétence. Cette liste sera réduite en éliminant tous les opérateurs qui ne permettent pas de vérifier les contraintes de précédence entre les opérations si i leur est affectée.

Le choix de l'opération courante i à affecter parmi ceux de même rang r se fait selon une règle de priorité. De même, une règle de priorité est utilisée pour la sélection de l'opérateur w parmi ceux de la liste L_{iw} . La condition d'arrêt de cet algorithme est $L_a=N$ et $L_n=\emptyset$, c'est-à-dire toutes les opérations sont affectées.

5.2.3 Règles de priorité proposées

Pour définir l'ordre d'affectation des tâches aux opérateurs, des contraintes s'imposent :

- Respect des relations de précédence entre les opérations,
- Tenir compte du temps d'exécution de la tâche qui dépend du facteur humain,

La définition des listes L_r groupant les opérations de rang r permet de satisfaire la première contrainte et garantir que toutes les tâches qui précèdent l'opération courante ont été antérieurement assignées.

Toutefois, au sein d'une même liste on aura des opérations candidates. Un choix quelconque de l'opération suivante qui doit être affectée implique une affectation aléatoire, ne garantissant pas nécessairement une bonne solution. Etant en quête de l'optimalité, des règles de priorités pour l'affectation de l'ensemble des tâches de L_r respectant la deuxième contrainte sont à établir.

Dans la littérature relative à l'équilibrage des lignes d'assemblage (Simple Assembly Balancing Problem-SALBP), un ensemble de règles a été défini. Ces règles ont été énumérées dans plusieurs travaux (Scholl, A., Voß, S., 1996), (Essafi, M., 2010), (Groussi, 1998).

Les règles de priorité proposées pour le problème SALBP ne sont pas toutes valables pour notre cas, particulièrement celles basées sur le temps d'exécution des opérations, les temps opératoires considérés étant déterministes.

Par contre, le problème ALWABP, qui tient compte simultanément de l'allocation des ressources humaines et de l'équilibrage des lignes d'assemblage, considère des temps opératoires dépendant de l'opérateur. Pour adapter les règles de priorité proposées à différentes variantes du ALWABP dans (Scholl, A., Voß, S., 1996), des modifications leur ont été apportées dans (Moreira *et al.*, 2012), (Araújo *et al.* 2012).

Dans (Moreira *et al.*, 2012), 16 règles de priorités, pour la sélection de l'opération à affecter, ont été listées.

Pour notre algorithme glouton, nous adoptons la règle de priorité suivante:

$$RP_i = \min_{i \in L_r} (\min_{w \in W} t_{iw})$$

Cette règle permet d'accorder la priorité à l'opération qui correspond au plus petit temps d'exécution au sein de la liste candidate, tenant compte de tous les opérateurs qui peuvent l'exécuter.

En ce basant sur cette règle, les opérations de L_r vont être listées dans l'ordre croissant de leur temps d'exécution et affectées aux opérateurs dans ce même ordre.

Pour l'opération courante i , la liste L_{iw} groupe tous les opérateurs candidats. Pour sélectionner un des opérateurs, on tient compte du degré de compétence des opérateurs (RPw_1) pour l'opération i et de leur charge (RPw_2). Pour cela, deux règles de priorités ont été définies :

$$RPw_1 = \min_{w \in L_{iw}} t_{iw}$$

$$RPw_2 = \min_{w \in L_{iw}} \sum_{i=1}^N t_{iw} * x_{iw}$$

La première règle correspond à l'opérateur le plus rapide à exécuter i et la deuxième règle permet de privilégier l'opérateur le moins chargé parmi les autres opérateurs.

Dans le cas d'égalité, où la règle de décision (RP_i , RPw_1 ou RPw_2) ne permet pas de faire la sélection entre les opérations ou les opérateurs candidats à l'affectation, on passe à la règle de priorité suivante pour distinguer l'élément prioritaire à choisir.

Algorithme glouton

1. **Données :** $N, H, P[N][N], T_{iw}[N][H]$,
2. **Variables de décision :** $X_{iw}[N][H]$
3. **Initialisation :** $L_n=N, L_a=\emptyset, r=1, L_r=\emptyset, D_{uv}[H][H]$,
4. **Tant que** $L_n \neq \emptyset$ **Faire**
5. Déterminer les opérations de la liste L_r de rang r
6. Définir l'ordre d'affectation des opérations de L_r selon la règle de priorité prédéfinie
7. **Pour tout** i de L_r **Faire**
Définir la liste L_{iw} des opérateurs pouvant exécuter i
8. **Pour tout** w de L_{iw} **Faire**
9. **Si** précédence entre opérations non respectée **Alors**
10. Supprimer w de L_{iw}
11. **Fin Si**
12. **Fin Pour**
13. Sélectionner l'opérateur w qui va exécuter i selon la règle de priorité prédéfinie
14. **Si** on va opter pour RPw_1 **Alors**
Trier les opérateurs de L_r par ordre croissant des T_{iw}
Si T_{iw} des 2 premiers opérateurs sont égaux
Alors Appliquer RPw_2 à ces 2 opérateurs

Fin Si**15. Sinon : Si** on va opter pour RPw_2 **Alors**

Trier les opérateurs de L_r par ordre croissant de la charge de l'opérateur w (T_w)

Si T_w des 2 premiers opérateurs sont égaux

Alors Appliquer RPw_1 à ces 2 opérateurs

Fin Si**Fin Si**

Affecter i courante à l'opérateur sélectionné (1^{er} de la liste L_{iw})

$X_{iw}[i][w]=1$

16. Mettre à jour $T_w = \text{sum}(X_{iw} * T_{iw})$

17. Mettre à jour D_{iv} (Etablir des relations de précedence entre les opérateurs si nécessaire)

18. Enlever i de L_n

19. Ajouter i à L_a

20. Fin Pour

21. Initialiser L_r

22. $r \rightarrow r+1$ //passer au rang suivant

23. Fin Tant que

Tableau 3 : Algorithme Glouton proposé

6 ETUDE EXPERIMENTALE**6.1 Résolution du Modèle 1**

Afin de résoudre notre problème, nous avons codé le Modèle 1 avec le modeleur-solveur Cplex, en utilisant un ordinateur portable équipé d'un processeur Intel(R) Core(TM) i3 CPU M370 @2.40GHz 2.40 GHz.

Instances Testées et Résultats

Afin de résoudre le modèle 1, on l'a programmé avec Cplex. Dans le tableau 4, nous présentons un ensemble d'instances de petites tailles (variant de 5 à 18), générées aléatoirement. Ils diffèrent par le nombre d'opérations N , le nombre d'opérateurs H et le nombre de stations S ($S=H$). Les valeurs de ces paramètres, pour chaque instance, sont illustrées dans le tableau 4, où on a présenté les différents résultats obtenus.

Des instances de taille moyenne (25 et 28) issues de la littérature relative au ALWABP, figurent dans le tableau 5. Ces instances sont proposées par (Chaves et al., 2007). Nous avons considéré deux groupes d'instances appelées Roszieg ($N=25$) et Heskia ($N=28$) groupant chacun 10 instances ayant le même graphe de précedence mais différent par la matrice de compétence.

Les critères d'évaluation qu'on a calculé afin d'évaluer les résultats obtenus sont le temps d'exécution du programme et la Déviation (%) de la borne inférieure BI définie précédemment par rapport à la solution optimale fournie par Cplex.

Ce calcul de la déviation sert à évaluer la qualité de BI .

Le pourcentage de déviation est calculé en utilisant la formule suivante :

$$\text{Déviation (\%)} = \frac{(BI - \text{solution optimale})}{\text{solution optimale}}$$

Instance	N	H	S	Tc	BI	Déviation (%)	Temps d'exécution
1	5	3	3	3	1	67%	0.18
2	6	3	3	6	5	-17%	0.17
3	10	4	4	8	2	-75%	0.54
4	10	5	5	150	31	-79%	1.84
5	10	6	6	120	31	-74%	4.45
6	18	7	7	177	26	-85%	48.21

Tableau 4 : Résultats des instances générées aléatoirement

Instances	N	H	S	Tc	BI	Déviation (%)	Temps d'exécution
Roszieg	1			20	11	-45%	11.21
	2			23	12	-48%	15.16
	3			18	11	-39%	12.94
	4			18	10	-44%	13.41
	5	25	4	16	9	-44%	16.74
	6		4	24	14	-42%	17.29
	7			17	12	-29%	11.58
	8			20	13	-35%	12.52
	9			21	10	-52%	15.82
	10			19	11	-42%	15.48
Heskia	1			94	44	-53%	11.90
	2			94	33	-65%	11.98
	3			93	51	-45%	11.70
	4			103	55	-47%	9.82
	5	28	7	92	33	-64%	9.57
	6		7	98	41	-58%	12.90
	7			116	93	-20%	9.59
	8			86	52	-40%	10.61
	9			95	47	-51%	14.01
	10			142	83	-42%	01.98

Tableau 5 : Résultats des instances Roszieg et Heskia

Les résultats présentés dans le tableau 4 et 5 montrent que la déviation de BI par rapport à la solution optimale est très grande.

Cplex permet d'avoir une solution optimale rapidement en quelques secondes pour les instances de petites et de moyennes tailles.

Notons qu'on a testé également le modèle 1 pour les instances Tonge ($N=70$, $H=10$) et Wee-mag ($N=75$, $H=11$) de la littérature et qui sont de grandes tailles. Pour ces instances, on a dépassé 4h d'exécution et on n'a pas eu de résultats.

Ces résultats permettent de conclure aussi que la borne inférieure qu'on a définie n'est pas de bonne qualité puisque le pourcentage de la Déviation est grand. Dans le but d'améliorer cette borne, d'autres relaxations peuvent être proposées pour avoir une nouvelle borne meilleure que BI .

6.2 Résolution du Modèle 2

L'algorithme glouton a été implémenté en langage C++. Afin d'illustrer les différentes étapes de résolution du problème avec cet algorithme, nous avons transmis le résultat obtenu après chaque itération de l'algorithme jusqu'à l'obtention de la solution complète, pour

l'exemple qu'on a programmé. Notons que la règle de priorité adoptée pour le choix de l'opérateur est RPw_1 . Il est à souligner également que $X_{iw}[i][w]=(-1)$ dans la matrice de compétence signifie que l'opérateur w ne peut pas exécuter l'opération i . Et dans la matrice de précedence entre les opérateurs $D_{uv}[u][v]=(-1)$ lorsque l'opérateur w doit précéder u .

6.2.1 Exemple numérique de résolution du Modèle 2

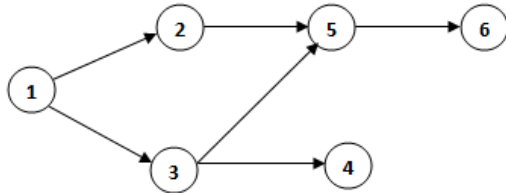


Figure 3 : Graphe de précedence

****Données du problème****

$N=6$ et $H=3$

****Matrice d'adjacence****

P[N][N]:	0	1	1	0	0	0
	0	0	0	0	1	0
	0	0	0	1	1	0
	0	0	0	0	0	0
	0	0	0	0	0	1
	0	0	0	0	0	0

****Temps opératoire****

$T_{iw}[N][H]$:	4	-1	3
	4	5	4
	3	6	2
	1	5	-1
	1	2	3
	6	4	-1

*****affichage des listes initiales*****

$L_n = \{1,2,3,4,5,6\}$

$L_r = \emptyset$

$L_{iw} = \{1,2,3\}$

$L_a = \emptyset$

*****Détermination des rangs et Affectation *****

Rang=1

$L_r = \{1\}$

pour $i=1$, $L_{iw} = \{1,3\}$

après tri: $L_{iw} = \{3,1\}$

$X_{iw}[1][3]=1$

****Précedence entre opérateurs****

$D_{uv}[H][H]$:	0	0	0
	0	0	0
	0	0	0

$L_a = \{1\}$

$L_n = \{2,3,4,5,6\}$

****Rang=2****

$L_r = \{2,3\}$

pour $i=2$, $L_{iw} = \{1,2,3\}$

après tri: $L_{iw} = \{1,3,2\}$

$X_{iw}[2][1]=1$

****Précedence entre opérateurs****

$D_{uv}[H][H]$:	0	0	-1
	0	0	0
	1	0	0

pour $i=3$, $L_{iw} = \{1,2,3\}$

après tri: $L_{iw} = \{3,1,2\}$

$X_{iw}[3][3]=1$

****Précedence entre opérateurs****

$D_{uv}[H][H]$:	0	0	-1
	0	0	0
	1	0	0

$L_a = \{1,2,3\}$

$L_n = \{4,5,6\}$

****Rang=3****

$L_r = \{4,5\}$

pour $i=4$, $L_{iw} = \{1,2\}$

après tri: $L_{iw} = \{1,2\}$

$X_{iw}[4][1]=1$

****Précedence entre opérateurs****

$D_{uv}[H][H]$:	0	0	-1
	0	0	0
	1	0	0

pour $i=5$, $L_{iw} = \{1,2,3\}$

après tri: $L_{iw} = \{1,2,3\}$

$X_{iw}[5][1]=1$

****Précedence entre opérateurs****

$D_{uv}[H][H]$:	0	0	-1
	0	0	0
	1	0	0

$L_a = \{1,2,3,4,5\}$

$L_n = \{6\}$

****Rang=4****

$L_r = \{6\}$

pour $i=6$, $L_{iw} = \{1,2\}$

après tri: $L_{iw} = \{2,1\}$

$X_{iw}[6][2]=1$

****Précedence entre opérateurs****

$D_{uv}[H][H]$:	0	0	-1
	-1	0	0
	1	1	0

$L_a = \{1,2,3,4,5,6\}$

$L_n = \emptyset$

****Matrice d'affectation****

$X_{iw}[N][H]$:	0	0	1
	1	0	0

0	0	1
1	0	0
1	0	0
0	1	0

****Précédence entre opérateurs****

$D_{uv}[H][H]:$	0	1	-1
	-1	0	0
	1	1	0

*****Charge horaire des opérateurs*****

$T_w[1]=6$

$T_w[2]=4$

$T_w[3]=5$

Temps de cycle de la ligne : $T_c=6$

La solution finale est présentée sous forme d'une matrice d'affectation et qui peut être schématisée par un graphe (figure 4). Tandis que la figure 5 illustre les nouvelles relations de précédence définies entre les 3 opérateurs.

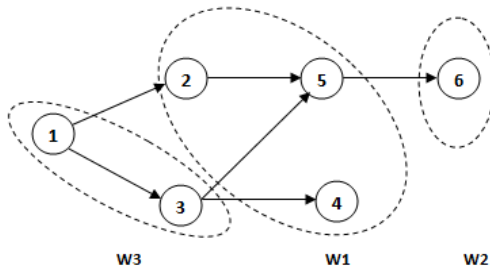


Figure 4 : Solution Finale

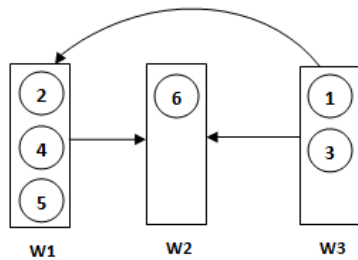


Figure 5: Graphe de précédence entre opérateurs final

Instances Testées et Résultats

Instance	N	H	Tc	Temps d'exécution
1	5	3	5	0.93
2	6	3	6	0.79
3	10	4	13	1.31
4	10	5	363	1.50
5	10	6	363	1.67
6	18	7	363	1.81

Tableau 6 : Résultats avec heuristique (Avec RPw_1)

Instance	N	H	Tc	Temps d'exécution
1	5	3	6	0.59
2	6	3	16	0.68
3	10	4	15	1.39
4	10	5	379	1.53
5	10	6	606	1.71
6	18	7	293	1.84

Tableau 7 : Résultats avec heuristique gloutonne (Avec RPw_2)

Les mêmes instances du tableau 4 ont été testées avec l'heuristique gloutonne pour résoudre le modèle 2. Les résultats sont présentés dans le tableau 6, dans le cas où la règle de priorité RPw_1 a été utilisée pour le choix de l'opérateur qui va exécuter l'opération courante, dans le tableau 7 pour le cas de RPw_2 .

En comparant ces résultats avec ceux obtenus par Cplex, pour les mêmes instances, nous constatons que l'algorithme glouton fournit des solutions plus rapidement. Il est également clair que l'utilisation de RPw_1 mène à des résultats meilleurs que ceux de RPw_2 , ceci nous appelle à adopter la règle RPw_1 dans l'étude de nouvelles méthodes de résolution.

7 CONCLUSION ET PERSPECTIVES

Dans cet article, nous avons présenté des solutions d'affectation des ressources humaines aux lignes d'assemblage satisfaisant l'objectif de minimiser le temps de cycle.

Tout d'abord, une borne inférieure du temps de cycle de la ligne a été proposée et évaluée. La déviation de cette borne par rapport à la solution optimale obtenue par la résolution du modèle 1 avec CPLEX a permis de conclure que la qualité de cette dernière n'est pas satisfaisante, il serait alors intéressant de développer de meilleures bornes inférieures et permettre ainsi de juger de la performance des approches de résolution.

Nous avons également présenté et testé notre approche de résolution basée sur une heuristique gloutonne. Pour ce faire, des règles de priorités ont été définies afin d'affiner le choix entre plusieurs solutions. Notre étude numérique a montré que la règle RPw_1 fournit des résultats meilleurs que ceux obtenus avec RPw_2 , ce qui peut justifier le choix de cette règle pour une future.

Il est à noter aussi que nous avons obtenu grâce à cette méthode des solutions d'affectation en quelques secondes.

En guise de conclusion, nous affirmons que la résolution de ce problème d'optimisation combinatoire NP-difficile, avec des méthodes exactes, reste limitée à des problèmes de tailles plutôt réduites. Les solutions approchées sont alors l'axe à suivre pour des problèmes de tailles conséquentes. Un effort est à fournir pour proposer des bornes inférieures plus efficaces et trouver un meilleur compromis qualité de la solution / temps de résolution avec l'utilisation des métaheuristic.

REFERENCES

- Araújo, F. F., Costa, A. M., and Miralles, C., 2012. Two extensions for the ALWABP: Parallel stations and collaborative approach. *International Journal of Production Economics*, 140(1), 483-495.
- Baybars, I., 1986. A survey of exact algorithms for the Simple Assembly Line Balancing. *Management Science*, 32, pp. 909-932.
- Bennour, M., Addouch, S., & El Mhamedi, A.. 2005. RCPSP sous contraintes de compétences dans un service de maintenance. *Computers & Operations Research*, 32, 491-507.
- Blum C., and Miralles C., 2011. On solving the assembly line worker assignment and balancing problem via beam search, *Computers & Operations Research* 38, 328-339.
- Borba L. M. and Ritt M.R.P., 2012. A task-Oriented Branch and Bound method for the Assembly Line Worker Assignment and Balancing Problem CLAIO SPBO, *Congreso Latino-Liberoamericano de Investigacion Operativa, Simposio Brasileiro de Pesquisa Operacional*, 3192-3201.
- Borba L and Ritt M., 2013. *Exact and Heuristic Methods for the Assembly Line Worker Assignment and Balancing Problem*, Instituto de Informatica, Technical Report Number: 368, Universidade Federal do Rio Grande do Sul.
- Borba, L., and Ritt, M., 2014. A heuristic and a branch-and-bound algorithm for the Assembly Line Worker Assignment and Balancing Problem. *Computers & Operations Research*, 45, 87-96.
- Certa, A., Enea, M., Galante, G., et Manuela La Fata, C., 2009. Multi-objective human resources allocation in R&D projects planning. *International Journal of Production Research*, 47(13), 3503-3523. DOI : 10.1080/00207540701824233.
- Chaves, A. A., Miralles, C., and Lorena, L. A. N., 2007. Clustering search approach for the assembly line worker assignment and balancing problem. *Proceedings of the 37th international conference on computers and industrial engineering*, Alexandria, Egypt, pp. 1469-1478.
- Chaves, A. A., Lorena, L. A. N., and Miralles, C. 2009. Hybrid metaheuristic for the assembly line worker assignment and balancing problem. *Hybrid Metaheuristics* (pp.1-14). Springer Berlin Heidelberg.
- Corominas, A., Pastor, R., & Rodríguez, E. 2006. Rotational allocation of tasks to multifunctional workers in a service industry. *International Journal of Production Economics*, 103(1), 3-9.
- Dakkak, B., Chater, Y. & A. Talbi, A. 2012. Modélisation d'un problème d'allocation des agents de maintenance, *CIGIMS'2012*. pp. 1-14.
- Essafi, M., 2010. Conception et optimisation d'allocation de ressources dans les lignes d'usinage reconfigurables, Thèse de Doctorat, École Nationale Supérieure des Mines de Saint-Étienne.
- Ghosh, S., Gagnon, R. J., 1989. A Comprehensive Literature Review and Analysis of the Design, Balancing and Scheduling of Assembly Systems, *International Journal of Production Research*, 27 (4), pp. 637-670.
- Groussi, A., 1998. Equilibrage des lignes d'assemblage : théorie et application, Mémoire, Université de Québec à Trois-Rivières, Canada.
- Lanzarone, E., and Matta, A., 2014. Robust nurse-to-patient assignment in home care services to minimize overtime under continuity of care. *Operations Research for Health Care*.
- Miralles, C., García-Sabater, J. P., Andrés, C., and Cardós, M., 2008. Branch and bound procedures for solving the assembly line worker assignment and balancing problem: Application to sheltered work centres for disabled. *Discrete Applied Mathematics*, 156(3), 352-367.
- Moreira M. C. O., and Costa, A. M., 2009. A minimalist yet efficient tabu search algorithm for balancing assembly lines with disabled workers, *Pesquisa Operacional na Gestao do Conhecimento, Porto Seguro*, 660-671, XLI SPBO.
- Moreira, M. C. O., and Costa, A. M., 2012. Hybrid heuristics for planning job rotation schedules in assembly lines with heterogeneous workers. *International Journal of Production Economics*.
- Moreira, M. C. O., Ritt, M., Costa, A. M. and Chaves, A. A., 2012. Simple heuristics for the assembly line worker assignment and balancing problem, *Journal of heuristics* 18: 505-524.
- Mutlu, Ö., Polat, O., & Supciller, A. A., 2013. An iterative genetic algorithm for the assembly line worker assignment and balancing problem of type-II. *Computers & Operations Research*, 40(1), 418-426.

- Scholl, A., Voß, S., 1996. Simple assembly line balancing—Heuristic approaches. *Journal of Heuristics*, 2, 217-244.
- Schaus, P., Van Hentenryck, P., and Régim, J. C., 2009. Scalable load balancing in nurse to patient assignment problems. *Integration of AI and OR Techniques in Constraint Programming for Combinatorial Optimization Problems* (pp. 248-262). Springer Berlin Heidelberg.
- Selaru, C., 2012. Resource allocation in project management. *International Journal of Economic Practices and Theories*, 2(4), 274-282.
- Tan, S., Weng, W., & Fujimura, S. 2009. Scheduling of Worker Allocation in the Manual Labor Environment with Genetic Algorithm. *Proceedings of the International MultiConference of Engineers and Computer Scientists* (Vol. 1).
- Vilà, M., & Pereira, J., 2014. A branch-and-bound algorithm for assembly line worker assignment and balancing problems. *Computers & Operations Research*, 44, 105-114.